

Teknillinen korkeakoulu
Prosessi- ja materiaalitekniikan osasto
Puunjalostustekniikan laitos

Jukka-Matti Löppönen

CRT-POHJAINEN VISUALISOINTI

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 03.11.1993

Työn valvoja: professori Hannu Saarelma
Työn ohjaaja: professori Hannu Saarelma

Tekijä ja työn nimi:

Jukka-Matti Löppönen

CRT-POHJAINEN VISUALISOINTI

Päivämäärä: 03.11.1993**Sivumäärä:** 115**Osasto:**Prosessi- ja materiaalitekniikan osasto
Puunjalostustekniikan laitos**Professuuri:**Aut-75
Graafinen tekniikka**Työn valvoja:**

Prof. Hannu Saarela

Työn ohjaaja:

Prof. Hannu Saarela

Diplomityön tavoitteena oli kartoittaa paperin ja painojäljen näyttövisualisointiin vaikuttavat tekijät ja rakentaa systeemi, jossa paperia ja painojälkeä visualisoidaan tietokoneen näytöllä. Näyttövisualisoinnin luotettavuus testattiin parivertailumenetelmällä.

Diplomityön teoriaosuuden luvuissa 2-3 määritettiin visualisointiympäristö ja visuaalihavainnon muodostumiseen vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi tarkasteltiin kuvan ja kuvasysteemin laatumittoja, luvut 4-5. Luvussa 6 määritettiin käsite visuaalinen kuvalaatu ja sen mittamiseen soveltuva parivertailumenetelmä. Diplomityössä visualisointi perustui paperin CCD-kameradetektioon ja detektion näyttöesitykseen. Määritettiin digitoinnin ja näyttöesityksen laatumittoja (luvut 7-9). Luvussa 10 selvitettiin painojäljen CRT-simulaatiota.

Kokeellisessa osassa määritettiin visualisointiaseman näytön ja digitointi systeemin laatu. Kalibroitiin näyttö D65-standardi-illuminanttia vastaavaan tilaan. Kalibroinnissa käytettiin Sequel Imaging:n näyttöjen kalibrointiin soveltuvaa mittalaitetta. Näytön väriavaruus ja maksimidensiteetti ovat riittäviä painojäljen/paperin näyttövisualisointiin. Valittiin visualisoitavat paperit, joiden objektiivinen laatu mitattiin värillisyyden, karheuden ja kiillon mittauksin. Paperit syötettiin eri kuvauskulmilla visualisointiasemaan CCD-kameralla digitoimalla. Digitaalimuotoisten paperien värillisyyttä säädettiin vastaamaan orginaalipapereiden värillisyyttä.

Työssä rakennettiin ideaalirastereita l. rasterirakenteita, jotka vastaavat mahdollisimman hyvin näytön resoluution asettamissa rajoissa konventionaalisia rasterirakenteita. Rasterirakenteen ja digitoidun paperipohjan output-kuvauksella simuloitiin painojäljen muodostumista. Pisteleviäminen generoitiin suodattamalla rasterirakenteen ja digitaalisen paperipohjan yhteiskuvaus. Menetelmä on approksimaatio, eikä ota huomioon paperin/painoväriin vuorovaikutussuhteita.

Visualisointiasemassa esitettävän kuvauksen ja orginaalipapereiden subjektiivinen laatu määritettiin parivertailumetriikalla. Tulosten analysoinnissa käytettiin hyväksi MDS-ohjelmistoa ja pisteytysmenetelmää. MDS-mallin antamien koordinaattiakselien ja tunnettujen laatulukujen välille laskettiin korrelaatiot. MDS-analyysin paperiorginaalien mallit ja digitaalisten papereiden mallit pääsääntöisesti erosivat toisistaan. Pisteytysmenetelmän tulokset eivät olleet myöskään yhteneviä. Kiilto havaittiin molemmissa järjestelyissä, mutta kiillon laadussa oli eroa. Tulosten erilaisuutta voidaan selittää näyttösimulaation ja luonnollisen parivertailutilanteen erilaisuudella. Paperin näyttöesitys on kaksidimensionaalinen kuvaus ja on näin digitoitilaitteen resoluutio rajoitteinen näkemys paperista. Suurimmaksi ongelmaksi muodostui luminanssikontrasti, joka kalibroidussa näytössä ei ollut riittävä esim. pinnan kiiltoerojen aikaansaamiseksi korkeakiiltoisilla papereilla.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Teknillisen korkeakoulun graafisen tekniikan laboratoriossa.

Esitän kiitokseni työni valvojalle ja ohjaajalle Hannu Saarelmalle haastavasta aiheesta ja työn ohjauksesta sen erivaiheissa. Kiitokset myös TKK/Gra koko henkilökunnalle ja kotiväelle kärsivällisyydestä.

Espoossa 03.11.1993


Jukka-Matti Löppönen

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	1
1.1 Työn tausta ja tarkoitus	1
1.2 Työn rajausta ja toteutus	1
2 VISUALISOINTI	1
2.1 Visualisointiympäristö	3
3 VISUAALIHAVAINNONMUODOSTUMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	4
3.1 Havainnoitsijan ominaisuudet	6
3.1.1 Silmän rajoitukset	6
3.1.2 Ikä	7
3.1.3 Värinäkö	7
3.1.4 Visuaalinen adaptaatio	8
3.2 Työskentely olosuhteet	10
3.3 Valaistusominaisuudet	10
3.3.1 Illuminanssi ja luminanssi	10
3.3.2 Spektraalinen sisältö	11
3.3.3 Flicker ja Häikäisy	12
3.4 Kohdeattribuutit	13
3.4.1 Kontrasti	13
3.4.2 Pintarakenteet, koko ja muoto	14
3.4.3 Tarkasteluetaisyys, havainnointiaika ja liike	14
3.4.4 Värillisuus	15
4 KUVAN LAATUMITTOJA	15
4.1 Objektiivinen kuvan laatu	15
4.1.1 Dynaaminen alue	16
4.1.2 Kontrasti	16
4.1.3 Modulaatio	17
4.1.4 Kohina ja SNR	18
4.1.5 Värillisuus	19
4.1.6 Väriavaruuden tilavuus	21
4.1.7 Mittauskiilto	21
5 KUVASYSTEEMIN LAATUMITTOJA	22
5.1 MTF ja CTF	22
5.2 MTFA	23
5.3 ICS	25
5.4 SQF	25
5.5 SQRI	25
5.6 S	26

6 VISUAALINEN KUVANLAATU JA SEN MITTAUS	27
6.1 Visuaalinen kiilto	27
6.2 Parivertailu	28
6.2.1 MDS-analyysi	28
6.2.2 Pistesumma-analyysi	31
7 PAINOJÄLJEN VISUAALISOINTI CRT-NÄYTÖLLÄ	32
8 DIGITOINTI	32
8.1 Digitoinnin laatusuureet	35
8.1.1 Spektraalinen herkkyys	36
8.1.2 Resoluutio	37
8.1.3 Kohina	38
8.1.4 Dynaaminen alue ja CTF	39
9 CRT- NÄYTTÖ	40
9.1 CRT:n laatutekijät	42
9.1.1 Värillisyyys	42
9.1.2 Resoluutio	43
9.1.3 Osoitettavuus	45
9.1.4 Virkistystaajuus	45
9.1.5 Näytön luminanssi ja kontrasti	46
9.1.6 Geometrinen tarkkuus	49
9.1.7 Näytön koko	50
9.1.8 Katseluetäisyys	50
9.2 Näytön kalibrointi	52
9.2.1 Värikoordinaattien transformaatio ja värilämpötilan säätö	54
9.2.2 Gammakorjaus	55
10 PAINOJÄLJEN NÄYTTÖESITYS	56
10.1 Jaksollinen rasterointi	57
10.2 Värirasterointi näytöllä	59
10.3 Painojäljen ja CRT-esityksen vertailu	60
11 JOHTOPÄÄTÖKSIÄ TEORIAN PERUSTEELLA	63
12 KOKEELLINEN OSA	64
12.1 Toteutusympäristö	64
12.2 Tutkimussuunnitelma	65
13 TULOKSET	66
13.1 Näytön laadunmittaus	66
13.1.1 Mittaukset Photo Research PR-900 videofotometrillä	67
13.1.2 Mittaukset Photo Research PR-703 spektroradiometrillä	68
13.1.3 Mittaukset LS-110 luminanssimittarilla	71

13.2 Näytön laadunmittauksen yhteenveto	72
13.3 Näytön kalibrointi	73
13.3.1 Näytön kalibrointi System Calibrator- laitteen ja MonCal-ohjelmiston avulla	74
13.3.2 Kalibrointiproseduuri	75
13.3 Paperipohjien valinta ja laatuominaisuuksien mittaus	78
13.4 Paperipohjien digitointi	82
13.5 Digitoitujen paperipohjien säätö	86
13.6 Ideaalirastereiden luonti	88
13.7 Rasterirakenten ja paperin yhteisvaikutuksen visualisointi	90
13.8 Paperien ja digitoitien parivertailut	92
13.8.1 Paperiorginaalien parivertailujen MDS-analyysin tulokset	93
13.8.2 Digitoitujen paperipohjien MDS-analyysin tulokset	98
13.8.3 Paperien ja digitoitujen paperipohjien pistesumma-analyysin tulokset	104
14 JOHTOPÄÄTÖKSIÄ	107
15 KEHITYSKOHTIA	109
LÄHDELUETTELO	111
LIITTEET 13 KPL	

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta ja tarkoitus

Diplomityön tavoitteena kartoittaa paperin ja painojäljen näyttövisualisointiin vaikuttavat tekijät ja rakentaa systeemi, jossa paperia ja painojälkeä visualisoidaan tietokoneen näytöllä.

1.2 Työn rajausta ja toteutus

Teoriaosuudessa selvitetään kuvan ja kuvasysteemin laatumittoja ja yleisiä visuaalihavaintoihin vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi tarkastellaan signaalin digitoinnilta ja näyttöesitykseltä vaadittavia laatuominaisuuksia ja näiden laatusuureiden mittausta systeemissä, missä paperia ja painojälkeä pyritään visualisoimaan CRT-näytöllä.

Kokeellisessa osassa kalibroidaan CRT-monitori, valitut paperiorginaalit digitoidaan ja digitoitujen paperipohjien värillisyyttä säädetään vastaamaan orginaalien värillisyyttä. Visualisointisysteemin toimivuus testataan parivertailulla. Lisäksi rakennetaan ideaalirasteita ja pyrkien simuloimaan rasterirakenteen ja paperin vuorovaikutusta.

2 VISUALISOINTI

Visualisointi voidaan määritellä työkaluksi, jolla tietokoneelle syötetty data muutetaan monimuotoiseksi multidimensionaaliseksi (2D, 3D) esitykseksi. Visualisoinnissa tietokoneen ja ihmisen vuorovaikutuksesta luodaan konsepti, joka mahdollistaa visuaalitiedon havainnoinnin, käytön ja kommunikoinnin. Visualisointi on mediaialtään varsin nuorta (taulukko 1).

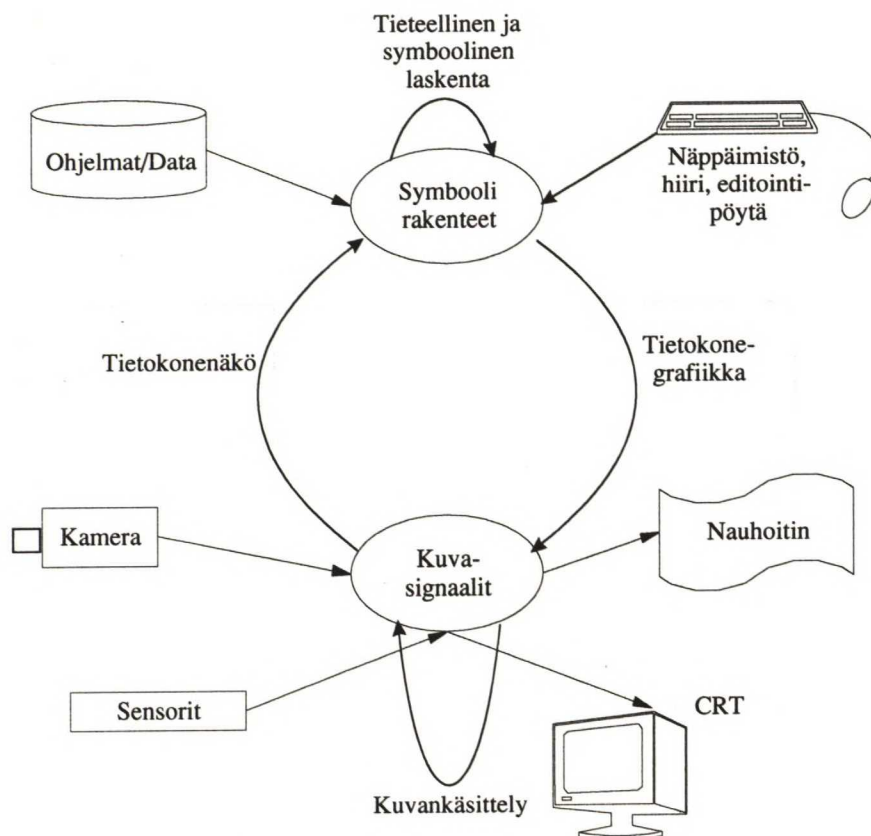
Taulukko 1. Visualisoinnin mediaikä verrattuna peristeisiin medioihin ./52/

Kommunikaatio media tyyppi	Ikä
Näkö	5×10^8
Puhe	5×10^5
Kirjoitustaito	5×10^3
Painotaito	5×10^2
TV-teknologia	5×10^1
Visualisointi	5×10^0

Visualisoinnissa yhdistyvät seuraavat itsenäiset, mutta konvergoivat kentät (kuva 2):

- Tietokonegrafiikka,
- Kuvankäsittely,
- Tietokonenäkö,

- Signaalin käsittely
- Käyttöympäristötutkimukset



Kuva 1. Visualisointiympäristön muodostamat erilaiset tieteelliset kentät ja näiden väliset vuorovaikutukset./52/

Visualisoinnissa käytettävä data voidaan jakaa kahteen luokkaan :

- **2- dimensionaalinen data** (esim. kartat, matemaattiset kuvaajat, aikakausilehti- en ja sanomalehti- en kuvat).

2-dimensionaalinen data on usein tallennettuna pikselitaulukkoina, kuten bitteinä tai tavuina(byte) ilman pinnan rakennekuvausta. Pikselitaulukon koko on riippuvainen kuvan resoluutiosta. Esimerkiksi 1024x1024 pikselin täysvärikuva, joka on koodattuna 8 bitillä/pikseli on kooltaan noin 3 Megatavua.

- **3-dimensionaalinen data**(esim. pinta- ja tilavuusmallit).

Kolmedimensionaaliset pintamallit ovat tallennettuina ohjelmina ja datana toisin kuin 2D- pikselikartat allaolevan rakennekuvausten säilyttämiseksi ja tallennustilan minimoimiseksi. Synteettisen 3D-esityksen visualisointivaiheet voidaan jakaa seuraaviin neljään kategoriaan:

1. Mallin määrittäminen, joka käsittää objektidatan luonnin. Objektidata on määritelty joko geometrisinä primitiiveinä graafisessa tietokannassa tai visuaaliseen tietoon perustuvina luonnoksina.

2. Mallin konstruktointi, tietokonelaskentavaihe, jossa tietokoneohjelman avulla luodaan tai simuloidaan kuvattu malli, jos data on määritelty pisteinä ja viivoina. Jos data on reaaliokuva, tietokone ohjelma analysoi syötteen ja laskee tulostekuvan tai numeerisen datan.

3. Mallin esitys, jossa tuotetaan kuvaus, joka ottaa huomioon kuvan värillisyyden, pintarakenteet, valonlähteet ja pinta-attribuutit.

4. Mallin näyttöesitys, mallin visuaalinen esitys./52/

2.1 Visualisointiympäristö

Visualisointiympäristö voidaan määritellä syöttölaitteen, tulostinlaitteen ja työaseman muodostamaksi kokonaisuudeksi, jossa visualisointi tapahtuu.

Syöttölaitteet voidaan jakaa kahteen luokkaan:

- 1: sensorit , kamerat (digitaalikamera), tietokoneet (esim, supertietokone GRAY) ja
- 2: interaktiiviset syöttölaitteet (datahansikkaat ja -kypärät).

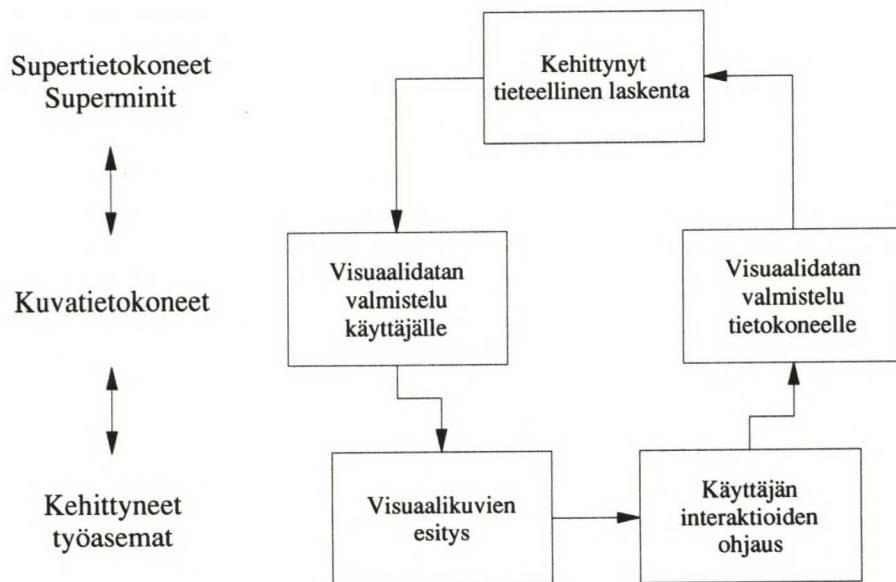
Työasemat voidaan jakaa vektoritietokoneisiin, pinnankuvaus- ja kuvankäsittelytietokoneisiin. Vektorityöasemia käytetään CAD/CAM ja reaaliaikaisessa 3D-suunnittelussa. Kuvankäsittelytyöasemat ovat yleisesti käytössä painotuotteen reproduktiossa. Tulostinlaitteet voidaan jakaa "raster scan"-näyttöihin, stereonäyttöihin ja nauhoittimiin. "Raster scan"- näytöt ovat usein konventionaalisia CRT-näyttöjä. CRT-näytöltä vaaditaan datan visualisoinnissa korkeaa pyyhkäisytaajuutta, resoluutiota ja laajaa väriavaruutta. Tyyppinen värirasterinäyttö on resoluutioltaan $\geq 1024 \times 1024$ pikseliä, pyyhkäisytaajuuden ollessa vähintään 60 Hz ja 24 bitin väriesityksellä/pikseli.

HDTV näyttötekniikan ja 4:2:2-digitaalivideon kehitys vaikuttavat visualisointiin. Tällä hetkellä markkinoilla on 2048x2048 pikselin näyttöjä sekä B/W-väriesityksellä, että RGB-esityksellä (esim. Sony 20" x 20" Trinitron). Stereonäytöt mahdollistavat kuvan kolmedimensionaalisen havainnoinnin. Stereonäytöt edellyttävät, että ihmisen näköjärjestelmä sopeutetaan, jotta stereohavainto näkyisi, esim. polarisaatiolaseja käyttämällä.

Visualisointi kasvattaa tiedostokokoa kuvan korkean resoluutiovaatimuksen johdosta. Tallennuskapasiteetti voi vaihdella kompressoimattomassa 2D esityksessä 256 kilotavusta (512x512 pikseliä 2^8 väriesityksenä) 24 megatavuun (2048x2048 pikseliä 2^{36} väriesityksenä). Kompression avulla (JPEG) tilantarve voidaan pienentään parhaillaan 90%:lla. Visualisointi asettaakin työaseman suorituskyvylle suuret vaatimukset reaaliaikaisuuden ja joustavuuden takaamiseksi. Laitekoonpano voisi olla seuraavanlainen:

- keskusmuistia ≥ 8 MB (64 MB),
- nopea sisäinen väylä (EISA),
- riittävä tallennuskapasiteetti (CDROM, 1GB)

Visualisoinnin eräs kehittyvä sektori tulee olemaan televisualisointi, tietoverkkojen avulla tapahtuva datan visualisointi. Televisualisointi mahdollistaa supertietokoneiden, minitietokoneiden keskittymisen vaativaan tieteelliseen laskentaan, kuvaesitys tietokoneiden valmistellessa datan ihmisten ja tietokoneiden käyttöön. Kehittyneiden työasemat esittävät visualisoinnin ja ohjaavat käyttäjän interaktiot eteenpäin suljetussa verkossa (kuva 2) ./52/



Kuva 2. Televisualisointi./52/

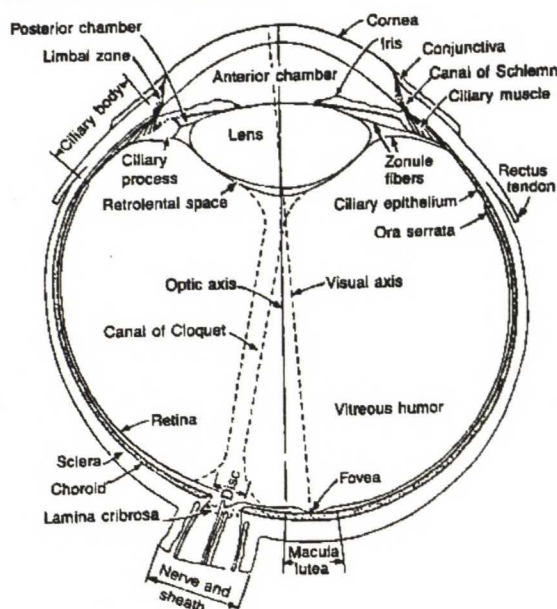
3 VISUAALIHAVAINNON MUODOSTUMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Näkeminen voidaan määritellä ulkopuolisesta maailmasta tulevan valoenergian fysikaalisena taltioitumisena /12/. Näkeminen voidaan jakaa kolmeen operaatioon:

1. Ulkopuolisesta maailmasta tulevan valon selektiivinen kerääntyminen (linssi).

2. Tämän valon projisoituminen ja fokusoituminen valoherkälle pinnalle (retina).
3. Valoenergian konversio kemiallisiksi muutoksiksi tai sähköiseksi aktiiviteetiksi, joka jollain tietyllä tavalla liittyy näkymään, josta valo on lähtöisin.

Ihmisen näköjärjestelmän kameran optikkaa vastaava elin on silmä. Silmä kerää ympäristöstä valon linssin avulla ja projisoi tästä kuvauksen verkkokalvolle (retina). Retinan valoherkät solut (sauvat ja tapit) reagoivat valoärsykkeeseen siirtäen ärsykeen mukaisen signaalin näköhermoa pitkin aivoihin (kuva 3). Aivot tulkitsevat saamansa tiedon ja muodostaa näköhavainnon.



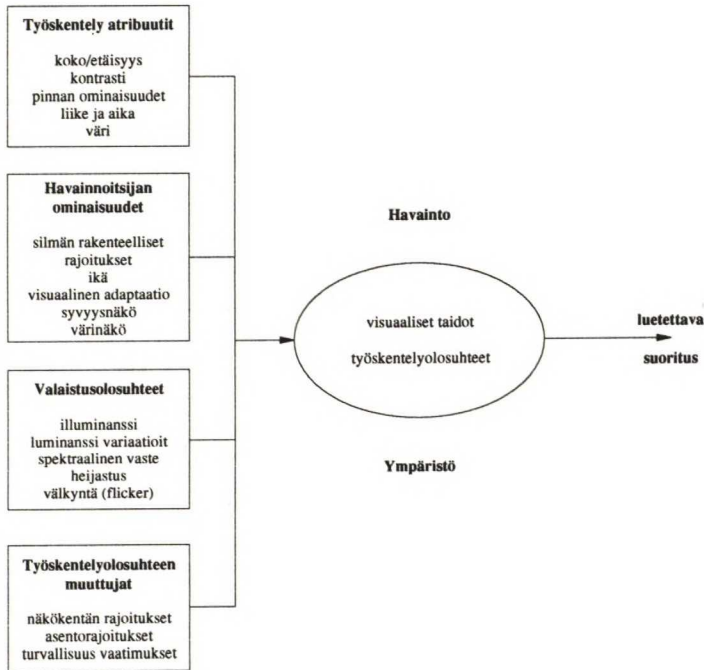
Kuva 3. Silmän rakenteen kaavio/31/.

Silmän yleisiä ominaisuuksia on listattu taulukossa 2.

Taulukko 2. Silmän laatuominaisuudet.

120 milj. sauvasolua, 6 milj. tappisolua ja 1 milj. hermosäiettä
 250 milj. reseptorisolua verrattuna television 250 000 kuvaelementtiin
 Pupillien välinen etäisyys on 50 - 70 mm
 Sauvasolut ovat 500 kertaa herkempiä valolle kuin tappisolut
 Efektiivinen elektromagneettisen säteilyn alue on 400 - 700 nm
 Sauvojen maksimaalisen herkkyyden aallonpituus on 510 nm (vihreä)
 Tappien maksimaalisen herkkyyden aallonpituus on 560 nm (oranssi)
 Intensiteettialue on 160 dB (kirkkaasta päivänvalosta hämäränäköön)
 Silmän resoluutio i. kyky erottaa yksityiskohtia on luokkaa $10' \sim 0,17^\circ$
 Silmä ei ole kaikissa tilanteissa lineaarinen

Havainnointiin visuaaliympäristössä vaikuttavat monet ympäristöstä, havainnoitsijasta ja havaintokohteesta riippuvat tekijät. Nämä tekijät on tunnettava ja niiden vaikutus on otettava huomioon, jotta luotettava suoritus mahdollistuisi (kuva 4).



Kuva 4. Signaalin havainnointi riippuu suurella määrällä ulkoisista tekijöistä ja havainnoitsijan aiemmista tiedoista ja kokemuksista./43/

Seuraavassa käydään läpi kuvassa 4 jaoteltuja visuaalihavaintoon vaikuttavia tekijöitä.

3.1 Havainnoitsijan ominaisuudet

Havainnoitsijalähtöisiä ominaisuuksia visuaalisten taitojen ja aikaisempien kokemusten lisäksi ovat näköön liittyvät tekijät; silmän rajoitukset, havainnoitsijan ikä, visuaalinen adaptaatio, syvyys- ja värinäkö.

3.1.1 Silmän rajoitukset

Silmän fokuointikyky edellyttää sofistikoitua säätöjärjestelmää, joka voi tunnistaa kiinnostavan osan esifokusoituneesta kuvasta ja liikuttaa linssiä terävöittääkseen objektin ja taustan rajan /12/. Silmän maksimiherkkyys saavutetaan olosuhteissa, joissa valo osuu silmään noin 20° foveasta alle 1 ms aikavälinä ja $10'$ kulmajakaumana siten, että 5 - 14 reseptoria saa yhden kvantin kukin. Jos silmän muoto on liian lyhyt, objektin kuva projisoituu verkkokalvon taakse (kaukonäköisyys, hyperopia). Vastaavasti silmän ollessa liian pitkä, kuva projisoituu verkkokalvon eteen (likinäköisyys, myopia). Seurauksena on verkkokalvo kuvan sumentuminen, joka taas vaikuttaa modulaation siirtoa (*MTF kappale 5.1*) laskevasti. Esimerkiksi +2,0 dipterin muutos optimaalisesta laskee resoluutiota jopa 20 cpd:llä. /38/

Silmän resoluutio l. kyky erottaa yksityiskohtia on luokkaa $10' \sim 0,17^\circ$. Näkö tarkkuus (Visual Acuity) laskee jyrkästi, jos kohteen kuvaus retinalla siirtyy retinan keskiosilta (fovea centralis) /43/. Tällä on vaikutusta tehtävissä, jotka vaativat yksityiskohtien erottamista, sillä fovea on silmän tarkan näön alue. Näkö tarkkuus muodostuu havainnointajan näön laadusta (esim. taittovika ja likinäköisyys), ympäristötekijöistä ja erityisesti havainnoidun luminanssin voimakkuudesta.

3.1.2 Ikä

Silmän näkö tarkkuus laskee 20:sta 60:een ikävuoteen mennessä $\sim 25\%$. Iän myötä kasvaa ihmissilmän herkkyys häikäisylle. Häikäisyn syynä on valon heijastuminen silmässä. Vanhetessa silmän kammiovesi muuttuu opaakkisemmaksi, tämän seurauksena valo heijastuu silmässä voimakkaammin jolloin visuaalinen kontrasti laskee. Visuaalisen kontrastin laskun seurauksena pienten luminanssivariaatioiden detektointikyky alenee. /9/

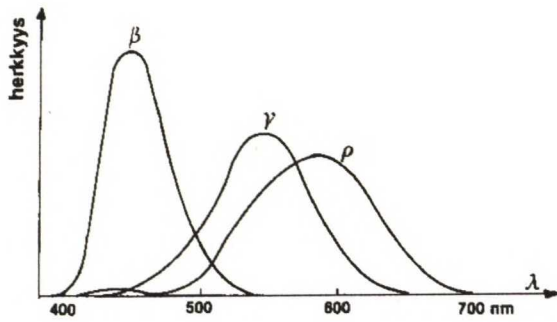
Silmän kyky akkomodoitua eri havaintoetäisyyksiin laskee myös iän myötä. Akkomodaatio tarkoittaa silmän fokusointia (normaalisti spontaani reaktio) näkö terävyyden maksimoimiseksi eri katseluetäisyyksillä. Diopteri on mitta silmän akkomodaatioalueelle. Viisivuotiaalla akkomodaatioalue on keskimäärin 14 diopteria, kun 50 vuotiaalla alue on 2 diopteria. Millimetreinä 14 dipteria vastaa noin 70 mm lähinäköalueella, 2 diopteria vastatessa 500 mm lähinäköalueella. Myös akkomodaationopeus laskee iän myötä. Taulukossa 3 on esitetty iän vaikutus lähinäköetäisyyteen.

Taulukko 3. Keskimääräiset lähinäköetäisyydet iän funktiona ./17/

Ikä (vuosina)	Lähinäköpiste (cm)
16	8
32	12
44	25
50	50
60	100

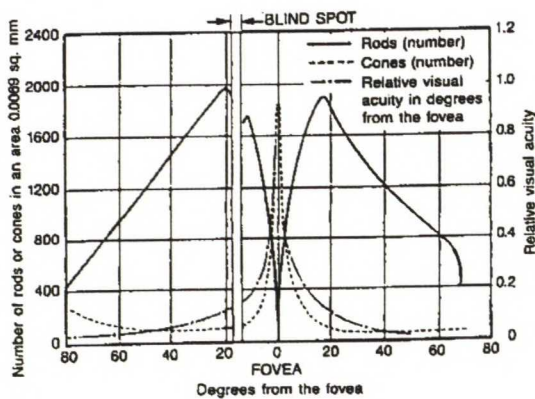
3.1.3 Värinäkö

Retinan valoherkistä soluista vain tapit reagoivat valon värillisyyteen, tappisolujen mahdollistaessa vaaleustasojen erottamisen hämärässä. Tappisolut voidaan edelleen jaotella α -, β - ja γ -soluiksi, joiden herkkyys valonaallonpituuteen on erilainen (kuva 5). Tämä mahdollistaa eri värien näkemisen.



Kuva 5. Tappisolujen herkkyys valon aallonpituuden funktiona /24/.

Kyky nähdä värejä vaihtelee retinalla ja on parhaimmillaan keskeisessä retinassa (kuva 6).



Kuva 6. Sauva- ja tappisolujen jakaantuminen retinalla/31/

Normaali silmä on sinisokea (tritanopic) keskeisessä foveassa. Olleakseen sensitiivinen tietyille värille verkkokalvon solun on välttämättä jätettävä huomioitta muihin väriin liittyvä valoenergia. /12/. Silmän värinäkö paranee luminanssin kasvaessa. Toisaalta jos silmä on adaptoitunut suhteellisen korkeaan taustaluminanssiin, matala luminanssisten värin erotuskyky laskee./1/

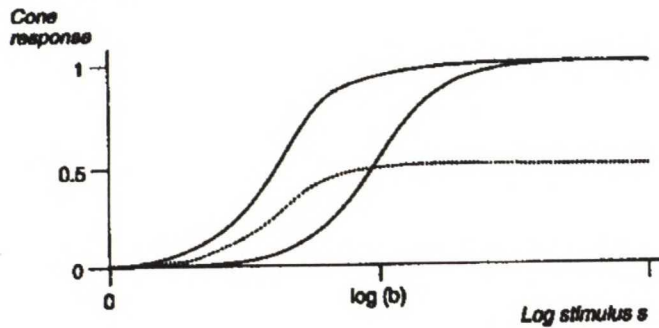
3.1.4 Visuaalinen adaptaatio

Ihmisen ympäristöstään näkemä kuva pyrkii pysymään likipitään samanlaisena valaistuksen voimakkuuden ja spektraalisten ominaisuuksien suuristakin muutoksista huolimatta. Suuri vaikutus tähän on adaptaatiolla. Adaptaatio voidaan jakaa kolmeen luokkaan

- 1) tummuusadaptaatioon,
- 2) vaaleusadaptaatioon ja
- 3) värillisyyssadaptaatioon

Tummuusadaptaatiossa silmä sopeutuu pimeään sauvasolujen adaptaation kautta. Niiden herkkyys muuttuu hämärien olosuhteiden mukaisiksi. Vaaleusadaptaatiosta puhutaan silloin kun luminanssi ylittää 125 Cd/m². Silmä adaptoituu valaistuksen vaihteluihin kahdella mekanismilla; pupillin pinta-ala muutoksella ja retinan reseptorien valokemiallisella reaktiolla. Värillisyyssadaptaatiolla tarkoitetaan ilmiötä, jossa silmä adaptoituu vallitsevan valaistuksen muutoksiin siten, että kohdeväreistä saatu värihavainto pysyy likipitään vakiona niitä valaisevan valonlähteen väristä riippumatta./24/ Värin intensiteetti vaikuttaa silmän väriadaptaatioon erilaisissa valaistusolosuhteissa.

Värillisyyssadaptaatiota voidaan verrata automaattiseen gain-säätöön, joka mahdollistaa kromaattisen informaation oikean esityksen dynaamiselta alueeltaan rajoittuneilla sensoreilla. Kuvassa 7 on adaptoitumisen aiheuttaman tappiärsykkeen riippuvuus ärsykkeeseen s .



Kuva 7. Adaptaatio mahdollistaa tappien reaktion, joka on riippuvainen ainoastaan kontrastista, ei luminanssin absoluuttisesta tasosta. Ylempi käyrä on pimeäadaptotuneiden tappien responssi, alemman käyrän edustaessa tappien adaptoitumista taustaärsykkeeseen/6/.

Tappien responssi kirkaaseen valoon (r) annetulla photonin "sieppauksella" (s), ja tappin adaptoituessa taustaärsykkeen, joka tuottaa "sieppauksen" (b) on esitetty kaavassa 1:

$$r = \frac{\left(\frac{s}{b}\right)^p}{\left(\frac{s}{b}\right)^p + 1} \quad (1),$$

jossa

p = vakio välillä 0,7 ... 1,0

Responssi r riippuu vain kontrastista $(s-b)/b$ eikä absoluuttisesta valaistuksesta. Tämä mahdollistaa ihmisen näköjärjestelmän laajan dynaamisen alueen./6/ Tappiresponssikäyrän on huomattu olevan riippuvainen ympäristöstä. Mitä hämärämpi ympäristö, sitä

matalampi on näkyvä kontrasti. Väriadaptaatiolle on tyypillistä, että adaptaation aste laskee adaptoivien ärsykkeiden saturoituessa.

3.2 Työskentelyolosuhteet

Työskentelyolosuhteilla tarkoitetaan tässä sitä ympäristöä, missä visuaalihavainto tapahtuu. Ympäristönä voi olla esim. parivertailun suorittamiseen rakennettu vakiollinen koeympäristö, näyttötyöskentely toimistossa, painotuotteen visuaalinen tarkastelu painolaitoksessa, sanomalehden luku ruokapöydän ääressä jne.

Kaikissa edellämainituissa tilanteissa olosuhteet asettavat rajoituksia havainnon luotettavalle suoritukselle häiriön asteen vaihdellessa. Ympäristölähtöisiä tekijöitä ovat mm. :

-Visuaalisenkentän rajoitukset (esim. näköesteet).

- Asentorajoitukset

-Turvallisuusnäkökohdat(esim. suojalasit)

3.3 Valaistusominaisuudet

Valaistusolosuhteilla on merkittävä vaikutus pinnasta, objektista havaittavan informaation määrään. Ympäristö suhteellinen vaaleus ja väri vaikuttavat yksittäisten värien ja kokonaisuuden havaintoon.

3.3.1 Illuminanssi ja luminanssi

Illuminanssi(E) l. valaistusvoimakkuus määritellään valovirran tiheytenä tietyssä pisteessä (kaava 2). Valovirta(Φ) on lähteen tai vastaanottajan emittoima valoteho.

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (2)$$







jossa

E = Illuminanssi [$\text{lx} = 1 \text{ lm/m}^2$],

Φ = valovirta [lm] ja

A = pinta-ala [m^2]

Ihmissilmän illuminanssidynamiikka on erittäin laaja muutamasta luxista noin 100000 lux:iin. Visuaalisen mukavuuden ja hyvän suorituksen takaamiseksi oikea illuminansitaso on tärkeä, esim CIE-standardin mukainen valaistuvoimakkuussuositus työpöydällä on 300 ...1000 lux. Kuvassa 8 on esitettynä valovoimakkuuden vaikutus kohteesta tehtävään havaintoon.

Daylight Streetlight Moonlight Effect			
Illuminance on the ground	100 000 Lux to 10 000 Lux	30 Lux to 3 Lux	0,1 Lux to 0,01 Lux
Action of the receptor cells	100% perception of colour by the cone cells	perception of black/white partly of colour	only perception of black/white by the rod cells
Area of the pupil	 5 to 10 mm ²	 10 to 30 mm ²	 30 to 50 mm ²
Ability of the eye to read text	A text must have a minimum size to be readable.	A text nA te minimum	

Kuva 8. Illuminssin vaikutus näkemiseen ./9/

Liian matala valaistusvoimakkuus rasittaa silmää ja laskee havaintotehoa. Matalakont-
rastisten tai pienikokoisten objektien havainnointisuoritusta voidaan parantaa valaistus-
voimakkuutta nostamalla.

Luminanssi on fysikaalinen mitta stimulille, joka tuottaa vaaleuden havainnon. Lumi-
nanssi on se tiettyyn suuntaan pinnasta heijastuneen tai emmitoituneen valon valo-
voima jaettuna samansuuntaisella projektioelementin pinta-alalla/43/. Luminanssin (L)
yksikkö on Cd/m^2 .

Luminanssitason nostolla voidaan parantaa kontrastiherkkyttä (kyky havaita pieniä
luminanssivariaatioita), resoluutiota sekä siirtää maksimiherkkyttä korkeammalle.
Esimerkiksi luminanssitason nosto tasosta 0,05 Cd/m^2 tasoon 500 Cd/m^2 parantaa
maksimiherkkyttä 1 cpd:stä 3 cpd:hen. Kontrastiherkkydessä muutos on
kymmenkertainen ja resoluution kohdalla parannus on 5 cpd:stä 40 cpd:hen. /38/

3.3.2 Spektraalinen sisältö

Valonlähteen emittoiman valon spektraalinen sisältö vaikuttaa siihen millainen visuaali-
nen värillisyyshavainto tarkastelijalle syntyy kohteesta. Värillisyyshavaintoon vaikutta-
vat lisäksi havainnoitsijan kromaattinen adaptaatio ja kohteen spektraalinenheijastusja-
kauma. Valonsäteilijän spektraalinen sisältö voidaan ilmaista lähteen värilämpötilana
Värilämpötila on sen ideaalisen mustan kappaleen (Planckian säteilijä) todellinen läm-
pötila (K°), joka säteilee karakterisoitavan laatuista valoa (värillisuus tai kromaattisuus)

/43/. Värilämpötilan symboli on T_C ja yksikkönä on Kelvin (K). Valonlähteet voidaan luokitella värilämpötilan mukaan kolmeen luokkaa (taulukko 4):

Taulukko 4. Valonlähteiden luokitus. /43/

Ryhmä	Väriluokka	Värilämpötila K
1	lämmin	< 3300
2	neutraali	3300 - 5500
3	kylmä	>5500

Ryhmä 1. käyttöaluesuositus on asuinympäristöjen valaistus, ryhmän 2. toimistoympäristöt ja työtilat. Ryhmän 3. valonlähteiden käyttöä suositellaan korkeaa valovoimakkuutta vaativissa erityistehtävissä, kuten väriverailuissa. Värilämpötila 5000 K on Suomessa standardin SFS 4912 mukainen valonlähde kuultokuvien ja heijastuskuvien tarkastelussa.

Värillisyydeltään ideaalista valoa on tasaenergiavallo, jossa säteilyn teho on yhtäsuuri kaikilla näkyvän aallonpituuksilla (Xenon-kaasupurkauslamput, päivänvaloloihosteputket). Hehkulampun etuna on spektrin piikittömyys verrattuna Xenon-lampun spektriin, mutta toisaalta haittatekijänä on säteilyn painottuminen punaiselle ja infrapunaiselle alueelle.

3.3.3 Flicker ja häikäisy

Flicker on jaksollisesti havaittava väliaikainen luminanssvaihtelu näkökentässä (oskiloiva luminanssi) /1/. Flicker:n aiheuttajana voi olla valonlähde tai illuminoitava kohde. Havaittava flicker-taajuus riippuu lähteen luminanssista ja pinta-alasta tai illuminoitavasta kentästä, retinalle heijastuvan kuvan asennosta, luminanssi/aika -käyrän muodosta ja vaihtelun amplitudista /43/. Kaikille vaihtovirralla toimiville valonlähteille on syklisiä variaatioita, joka voi aiheuttaa flickerin.

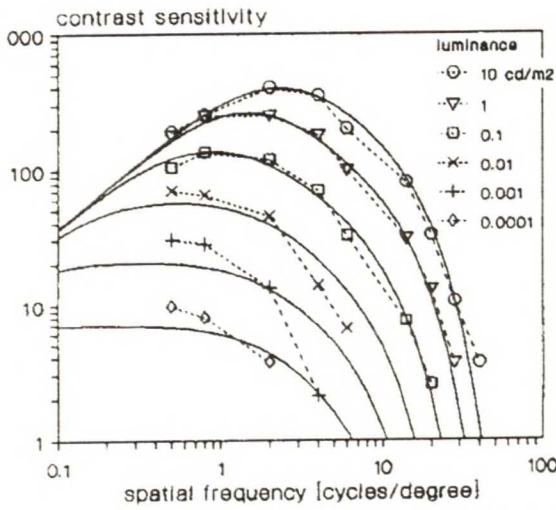
Häikäisy on näkemiseen liittyvä häiriö tai epämukavuus tilanteessa, jossa osa näkökentästä on erityisen kirkas suhteessa ympäristön valitsevaan kirkkauteen, johon silmä on adaptoitunut/43/. Eräs häikäisyn tyyppi on heijastushäikäisy, joka syntyy spekulari heijastuksesta kiillotetusta tai kiiltävästä pinnasta.

3.4 Kohdeattribuutit

Kohdeattribuutit ovat havainnoitavan kohteen ominaisuuksia, jotka vaikuttavat kohteesta muosotuvaan havaintoon.

3.4.1 Kontrasti

Objektin havainnointi ympäristöstään riippuu pääasiallisesti kontrastista, määriteltynä densiteetteinä, luminanssina tai värinä. Silmän kontrastiherkkyys kasvaa tiettyyn rajaan asti luminanssin kasvaessa (kuva9).



Kuva 9. Luminanssin vaikutus silmän kontrastiherkkyteen spatiaalitaajuden funktiona./2/

Kontrastiherkkyteen vaikuttaa myös kahden luminanssin tai värin raja-alueiden gradientit. Toisaalta kontrastiherkkyys laskee luminanssi- tai värikontrastin liian suurten variaatioiden seurauksena /43/.

Barten /4/ on selvittänyt mm. kontrastin vaikutusta kuvan visuaaliseen terävyyteen näytöllä. Bartenin mukaan kuvan visuaalinen terävyys näytöllä ei ole pelkästään riippuvainen kuvan epäterävyydestä, mutta myös suoran ympäristön tai heijastuneen valon aiheuttamasta kontrastin laskusta. Tämä kontrastin lasku ilmenee luminanssikuvion modulaatiosyvyyden monikertana kertoimella, joka on esitetty kaavassa 3. /4/.

$$\eta = \frac{L_{av}}{L_{av} + \Delta L}, \quad (3)$$

jossa

L_{av} = näytön keskimääräinen luminanssi,

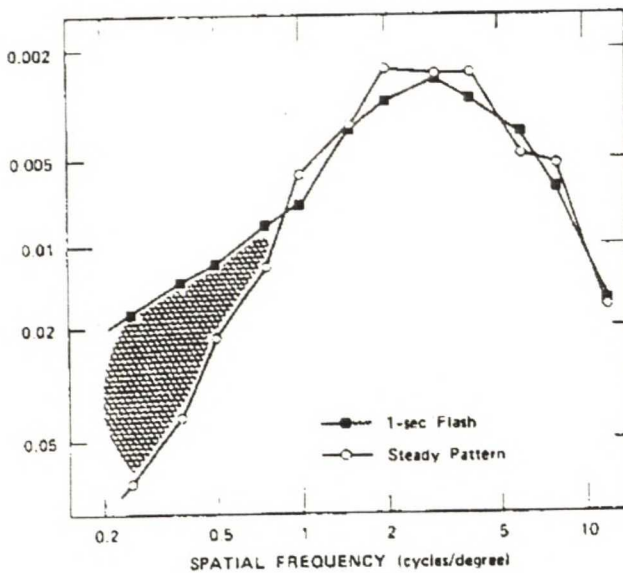
ΔL = ulkoisen valaistuksen aiheuttama luminanssin lisäys

3.4.2 Pintarakenteet, koko ja muoto

Pintarakenteen, koon ja muodon hahmottaminen, sisältää ainakin kolme funktiota: kontrastin, visuaalisten yksityiskohtien resoluution ja syvyyksien ja etäisyyksien havainnointia. Pintarakenteiden havainnointi riippuu varjon muodostuksesta ja valosta pinnalla. Lisäksi havainto on riippuvainen näön laadusta, havainnoitsijan aikaisemmista kokemuksista, kuten tunnettujen objektien koon ja muodon muistamisesta sekä optisen illuusion hahmottamisesta. /43/ Muodon tunnistaminen on riippuvainen kohteen koosta, kirkkautesta, paikasta ja orientaatiosta. Kiinnitetyltä katseluetäisyydeltä, subjektiivinen kuvanlaatu on lineaarisesti riippuvainen tarkasteltavan kohteen leveydestä. /59/

3.4.3 Tarkasteluetäisyys, havainnointiaika ja liike

Tarkasteluetäisyydellä ilmaistuna kuvakulmana on todettu olevan lineaarinen suhde subjektiiviseen laatuun. Tarkasteluetäisyyden kasvaessa kuvakulma pienenee, toisaalta kulkmaresoluutio kasvaa tarkasteluetäisyyden kasvaessa. /59/ Objektin havainnointi riippuu havainnointi ajasta. Mitä pitempi detektioaika sitä paremmin silmä ehtii adaptoitua kulloisenkin havainnointi tilanteeseen. Liikkuvan kuvan havaintotarkkuus riippuu nopeudesta, koosta, muodosta ja kontrastista. Jos kohde on suuri ja korkeakontrastinen lyhytkin detektioaika riittää. Havainto aika vaikuttaa matalien taajuuksien havaitsemiseen. Kohteen välkkyminen tuo esiin matalat taajuudet pienemmällä kontrastilla kuin jatkuvaa esitystapaa käyttäen (kuva 10)



Kuva 10. Testikuvion jaksollinen esitystapa korostaa matalia taajuuksia. /38/

3.4.4 Värillisyyys

Pinnan väri määräytyy pinnan heijastuskertoimesta eri valon aallonpituuksilla ja valaisevan valonlähteen spektristä. Visuaalisen spektrin muodostaa 400 ... 700 nm aallonpituus alue, joka käsittää noin 80 % auringon säteilemästä energiasta. Silmän detektoimasta valosta muodostuu subjektiivinen värivaikutelma.

Värihavainto ei ole riippuvainen pelkästään valon spektraalisesta sisällöstä, vaan myös havainnoitavan pinnan ominaisuuksista, luminanssista, värikontrastista ja väriadaptaation asteesta. Värin havainnointikyky kasvaa tiettyyn rajaan asti illuminanssin kasvaessa. Kuvan värillisten aluiden simultaanikontrasti, koko, terävyys ja muoto vaikuttavat värihavaintoon.

4 KUVAN LAATUMITTOJA

Visualisoinnin perustarkoituksena on tuottaa laadukas, eksakti kuvaus kohteesta. Kuvalla tarkoitetaan tässä minkä tahansa graafisessa eli kuvallisessa muodossa olevan elementin aktiivisesti aikaansaamaa valon intensiteetin tai värin jakaumaan tasoon asetettujen koordinaattien suhteen /35/. Kuvan laatu jakaantuu visuaaliseen eli subjektiiviseen ja fysiikkaalisesti mitattavaan eli objektiiviseen laatuun.

4.1 Objektiivinen kuvan laatu

Tässä työssä käsitellään seuraavia objektiivisia visualisointisysteemin laadumäärittelyssä käytettyjä kuvan, kohteen laatumittoja:

- dynaaminen alue (S),
- värillisyyys (CIE xyY 1931 ja CIE L*a*b*),
- väriavaruuden tilavuus (V),
- kontrasti (K),
- modulaatio (M),
- kohina,
- SNR ja
- kiilto (kiiltomittalaite)

4.1.1 Dynaaminen alue (S)

Dynaaminen alue (S) on maksimitoistoväli, jonka kuvaus (esim, painojälki, näyttökuvaus) kykenee toistamaan. Makroskooppisena mittana dynaaminen alue voidaan ilmaista joko densiteetti tai heijastuserotuksena (kaavat 4 ja 5):

$$S = D_{100\%} - D_{0\%} \quad (4)$$

$$S = R_{0\%} - R_{100\%} \quad (5)$$

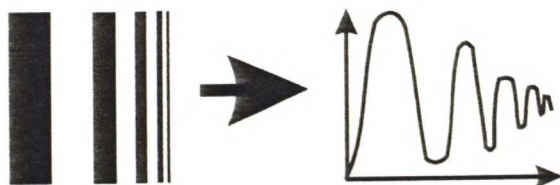
Mikroskooppisena laatumittana S määritellään palkkimuotoisesta testikuvioista mitattujen maksimi densiteetin ja minimi densiteetin erotuksena testikuvan taajuuden u funktiona (kaava 6):

$$S = D_{\max}(u) - D_{\min}(u) \quad (6),$$

jossa

$D_{\max}(u)$ ja $D_{\min}(u)$ = palkiston taajuudella u määritettyjä keskiarvoja

Dynaaminen alue supistuu pääsääntöisesti paikkataajuuden kasvaessa, mikä on seurausta läheisyysfektistä, kuten esim. pisteenleviäminen (kuva 11).



Kuva 11. Dynaamisen alueen (pystyakseli) supistuminen paikkataajuuden kasvaessa.

4.1.2 Kontrasti (K)

Kontrastille voidaan antaa joko subjektiivinen tai objektiivinen mitta-arvo. Subjetiivisena mittana kontrasti on havainnoijan henkilökohtainen arvio objektin kahden osan välisestä erosta nähtynä joko samanaikaisesti tai peräkkäin (kirkkauskontrasti, luminanssi-kontrasti, värikontrasti). Objektiivisena painatuksen makroskooppisena laatumittana kontrasti määritellään täyspeitteisen pinnan (100%) ja p-prosenttisen rasteripinnan välisenä suhteellisenä densiteettierona (kaava7):

$$K_{rel} = \frac{D_{100\%} - D_p}{D_{100\%}} \quad (7),$$

jossa

K_{rel} = Kontrasti,

$D_{100\%}$ = täyspeitteisen pinnan densiteetti ja

D_p = p-prosenttisen rasteripinnan kontrasti

Kontrastia käytetään myös absoluuttisen densiteettieron mittana (kaava 8):

$$K_{abs} = D_{100\%} - D_p \quad (8)$$

jossa

K_{abs} = Kontrasti,
 $D_{100\%}$ = täyspeitteisen pinnan densiteetti ja
 D_p = p-prosenttisen rasteripinnan kontrasti

Luminassikontrasti, jota käytetään vaaleussuhteiden mittana, määritellään (kaava 9):

$$K = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \quad (9)$$

jossa

K = Luminanssi kontrasti,
 L_1 = Dominoiva taustan luminanssi ja
 L_2 = kohteen luminanssi

Luminanssikontrastilla on suuri vaikutus esim. tekstin luettavuuteen paperilla, näytöllä ja pienten yksityiskohtien havainnoinnissa (katso kappaleet 3.3.1 ja 9.1.5).

4.1.3 Modulaatio (M)

Modulaatio määritellään mikroskaalassa testikuvan taajuuden funktiona saavutettavissa olevan suurimman ja pienimmän signaalin erotuksen suhteena signaalien summaan (Michelsson:n modulaatio, kaava 10):

$$M = \frac{f_{\max}(u) - f_{\min}(u)}{f_{\max}(u) + f_{\min}(u)} \quad (10)$$

Modulaatio on siis signaalin amplitudin ja signaalin keskiarvon suhde. Kuvan terävyys määräytyy pitkälti modulaatiofunktion perusteella, koska funktio ennustaa viivojen, fonttien ja rasteripisteiden muodostumista./35/

4.1.4 Kohina ja SNR

Kohina on mitta kuvassa olevalle tahattomalle tummuus tai väri vaihtelulle. Esimerkiksi jos mitattu signaali on pinnan värillisyyden Lab-koordinaatteina voidaan värillisyyden kohina laskea kaavalla 11.

$$rms_E = [rms_L^2 + rms_a^2 + rms_b^2]^{1/2} \quad (11)$$

Painojäljessä kohina on tyypillisesti riippuvainen värimäärästä paperilla ja siten täyspeitteisen pinnan densiteettiä Dmax. Rasteripinnoilla on kompaktipinnan epätaisuuden lisäksi kohinalähteenä rasterirakenne, rasteripisteiden koon ja muodon vaihtelu (kaava 12) /35,49/:

$$rms^2 = rms_{kompakti}^2 + rms_{rasteri}^2 + rms_{koko}^2 + rms_{muoto}^2 \quad (12)$$

Kohina voidaan ilmaista myös signaalin amplitudin ja kohinan r.m.s. arvon suhteena eli SNR- suhteena (kaava 13).

$$SNR = \frac{S}{rms} \quad (13),$$

jossa

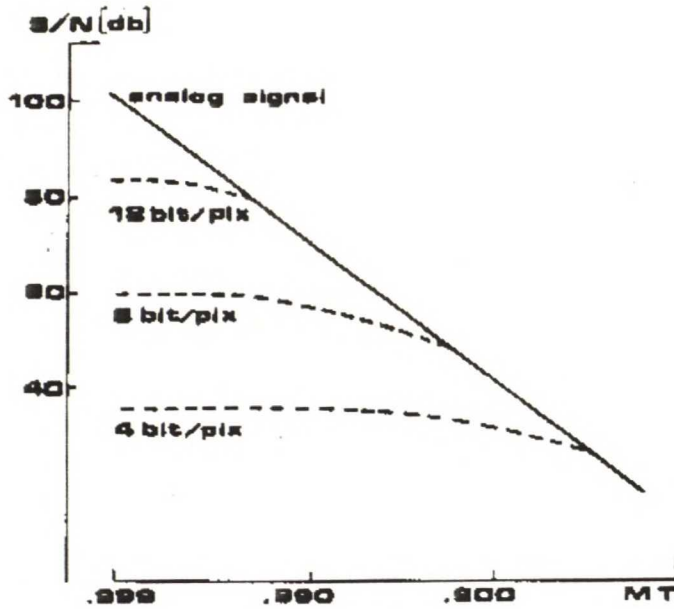
S = signaali,

rms = kohinan keskihajonta

Tai ilmaistuna desibeleinä [dB](kaava 14):

$$SNR_{dB} = 20 \log_{10} SNR \quad (14)$$

Esimerkiksi näytön keskiluminanssin ollessa 100 Cd/m² ja kun luminanssin kohinan r.m.s on 1 Cd/m² on näytön SNR = 20 lg(100/1) = 40 dB. CCD-kameroiden S/N suhde on yleensä ~ 46 dB. Korkearesoluutiojähdytetyillä CCD-kameroilla signaalikohinasuhde voi olla 60 dB. Elektro-optisessa kuvan muodostuksessa ilmenee aina satunnaiskohinaa. Esim CDD-kameran kennolle emittoituneiden partikkelien lukumäärä vaihtelee tietyn keskiarvon ympärillä. Tämän keskiarvon satunnaisvaihtelua sanotaan systeemin kohinaksi. Satunnaiskohina on taajuusriippumaton ("valkoista") eli tasaisesti yli kaistan leveyden jakautunutta. Sähköisillä laitteilla esiintyy yleensä lisäksi vahvistin ja Johnssonin kohinaa. /50/. Kuvasignaalin digitoinnissa digitoitintason äärellisestä lukumäärästä on seurauksena kvantisointikohinaa ja digitalisoidun signaalin SNR-tason lasku (kuva 12) (katso kappale 8.1.3)



Kuva 12. Digitoititarkkuuden (bittä/pikseli) vaikutus signaalin SNR:een./35/

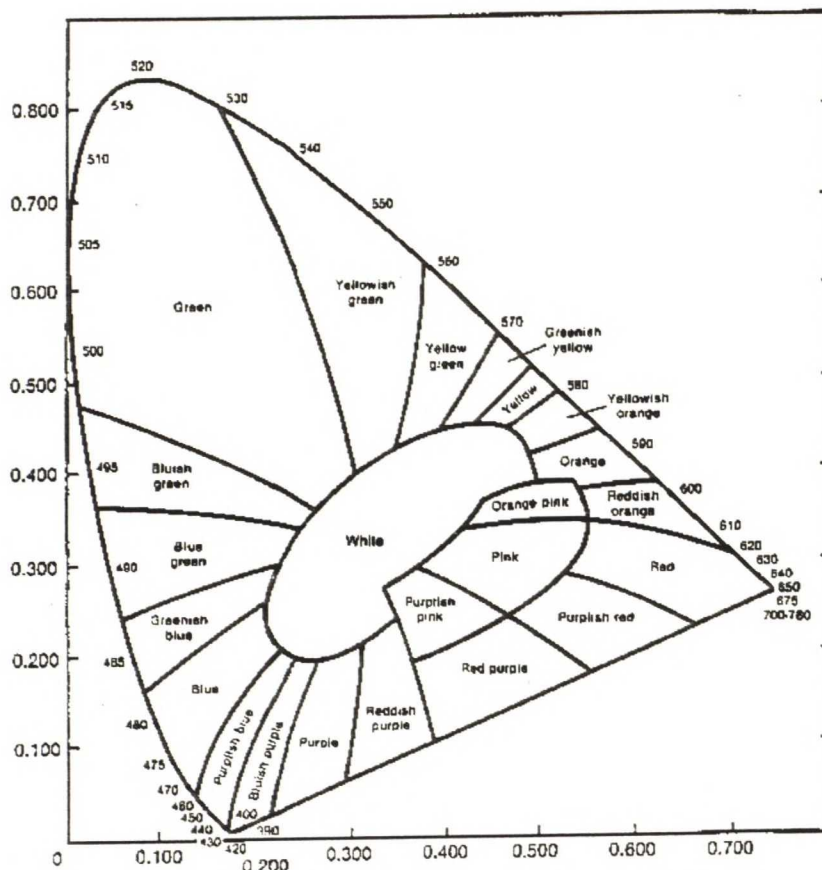
4.1.5 Värillisyyden

Visuaalisen värin (400 ... 700 nm) esittämiseen perustuvia värinesitystapoja l. värijärjestelmiä on useita. CIE:n kehitti ensimmäisen värinesitystandardinsa vuonna 1931, jolloin tavoitteena oli aikaansaada ihmisen värinäköä vastaava värin koodausjärjestelmä. Kehitettiin CIE xyY 1931 värimalli. Värinmittaus tehdään spektrofotometrisesti tai tristimulussuotimien avulla. Mallissa Y on valon tiheyskerroin, joka määrittää ihmissilmän ärsytyksen kokonaismäärän ja on vaaleuden fotometrinen vastike, x ja y määrittävät kromaattisuuden (kaava 15 ja kuva 13):

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (15),$$

joissa

X, Y ja Z = heijastusarvot



Kuva 13. CIE xyY värimallin xy-koordinaattien muodostama 2-dim. väriavaruus.

Heijastusarvot saadaan suoraan, jos mittausmenetelmänä on tristimulussuodinmittaus, spektrofotometrisessä mittauksessa heijastusarvot saadaan tulevan valon emissioon suhteutetuista spektrikäyristä.

Uudempi CIE värinesitysstandardi on CIE Lab vuodelta 1976. Järjestelmä on yleinen karateroitaessa näyttöjen värillisyyttä. CIE lab-koordinaatit luminanssi L^* ja värillisyysskoordinaatit a^* ja b^* lasketaan X, Y ja Z arvoista seuraavasti (kaava 16) /24/:

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_{ref}} \right)^{1/3} - 16$$

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_{ref}} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_{ref}} \right)^{1/3} \right] \quad (16),$$

$$b^* = 500 \left[\left(\frac{Y}{Y_{ref}} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_{ref}} \right)^{1/3} \right]$$

jossa

X_{ref} , Y_{ref} ja Z_{ref} = referenssivalkeisena käytetyn pinnan tai valonlähteen

XYZ-arvot

4.1.6 Väriavaruuden tilavuus (V)

Kolmidimensionaalinen väriavaruus on tulkittavissa valitussa värinesitystavassa väriarvojen rajaamaksi tilavuudeksi. Väriavaruuden tilavuus CIE Lab-koordinaatistossa voidaan laskea seuraavasti (kaava 17):

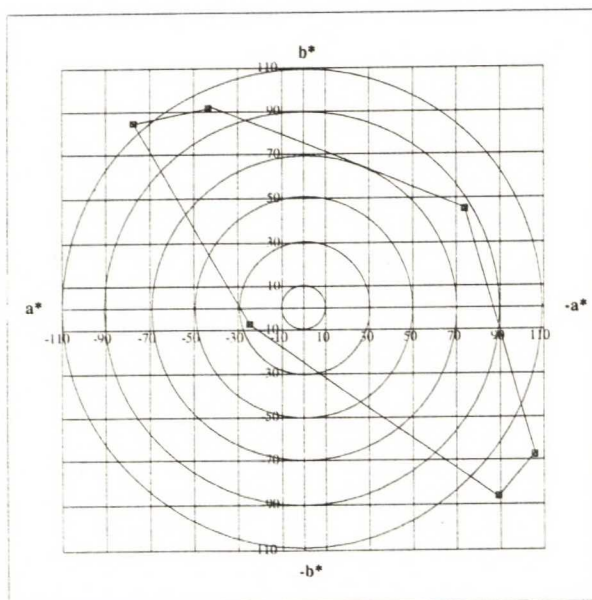
$$V = \frac{(L^*_{\max} - L^*_{\min})}{2} \int_0^{360} c^*_{\max}(h^*) dh^* \quad (17),$$

jossa

c = kroma (chroma),

h = sävykulma (hue)

Väriavaruus aproksimoidaan yleisesti pinta-alana. Esim. näytöltä mitattujen osavärikenttien CIE Lab:n a^* b^* -pisteiden rajaama alue (kuva 14).



Kuva 14. Näytön väriavaruuden pinta-ala aproksimaatio Lab-koordinaatistossa.

4.1.7 Mittauskiilto

Kiillolla tarkoitetaan yleisen määritelmän mukaan pinnan suuntavalikoivista heijastusominaisuuksista johtuvaa visuaalista havaintoa, missä havaintoon pinnasta yhdistyy siitä tapahtuvan valonlähteen tai kohteen heijastus. Objektiivisena mittana kiilto määritellään pinnan speulaarikiilto so. pintaheijatuksen määränä speulaarikulmassa. Pintaheijatuksen määrä on riippuvainen valon tulokulmasta ja pinnan heijastukertoimesta. Kiilto on mitta pinnan sileydelle. /47/. Paperin kiillon mittauksessa TAPPI T480 -standardin

mukainen mittausgeometria on $75^\circ/75^\circ$ apertuurikoolla $11,4^\circ$, toinen yleisesti käytetty mittausgeometria on $45^\circ/45^\circ$. Mittattu kiilto ilmaistaan yleensä näytteestä peiliheijastussuunnassa heijastuneen valon intensiteettisuhteena standardista heijastuneen valon intensiteettiin. Standardina käytetään yleensä mustaa lasia. Kiiltomittauksen ja silmän kiiltohavainnon eräänä erottavana tekijänä on se, että kiiltomittalaite summaa rajatulta alueelta heijastuneen valon intensiteetin mitta-apertuurin sisällä. Silmä taas rekisteröi hyvin monen pisteen intensiteettiä./40/ Painojäljessä pintaheijastus säätelee yhdessä painoväriin valonabsorptiokyvyn kanssa densiteetin muodosta täyspeitteisillä pinnoilla /60/. Vaikutus densiteettiin on lineaarinen pienillä värimäärillä, värimäärän kasvessa pintaheijastus rajoittaa tuummuuden muodostusta yhä enemmän. Densiteetille muodostuu täten kyllästystaso./47/

Pintaheijastuksen on todettu likaavan värejä ja värillisten värien tapauksessa muuttavan värin hallitsevaa aallonpituutta. Sävymuutoksien on todettu olevan pienintä vaaleilla väreillä (keltainen) ja värillisyyden muuttumisen olevan riippuvaista värin vaaleustasosta pintaheijastuksen funktiona. Lisäksi pintaheijastuksen vähentyessä painovärien luminanssi suurenee ja kylläisyys pienenee. /25, 23/

5 KUVASYSTEEMIN LAATUMITTOJA

Kuvasysteemillä tarkoitetaan tässä kuvan (digitaalisessa muodossa) esittämiseen tarvittavaa koejärjestelyä. Digitaalimuotoinen kuvaus voi olla generoitu ohjelmallisesti, analogisesta esityksestä A/D-muunnon avulla digitalisoitu kuvaus. Kuvasysteemin laatumitoista tässä käsitellään seuraavia:

- MTF ja CTF,
- MTFA,
- ICS,
- SQF,
- SQRI ja
- S

5.1 MTF ja CTF

Ekvivalenssi mittaa kohteen ja siitä tehdyn kuvan yhdenmukaisuutta. Tyypillinen ekvivalenssi systeemin laatumitta on modulaation siirtofunktio (MTF), joka määritellään sinimuotoisen intensiteettijakauman output- (Mout) ja input- (Min) modulaatioiden suhteina (kaava 18):

$$M(u) = \frac{M_{out}}{M_{in}} = \frac{\frac{g_{max} - g_{min}}{f_{max} - f_{min}}}{\frac{g_{max} + g_{min}}{f_{max} + f_{min}}} \quad (18),$$

joissa

f = input kuvafunktio,

g = output kuvafunktio

M(f) = taajuudesta f riippuva modulaation siirto l. modulaation siirtofunktio

Modulaation siirtofunktio kuvaa systeemin kontrastin siirtoa taajuuden funktiona/50/. Systeemillä voidaan tässä yhteydessä tarkoittaa linssiä, videokameraa, monitoria, näköjärjestelmää tms.

Kontrastinsiirtofunktio CTF määritellään usea taajuisesta palkkikuviosta. Esim. painatuksen CTF:n saadessa arvon yksi on painatuksen kontrasti yhtä hyvä kuin orginaalin. Sekä MTF ja CTF laskevat yleensä taajuuden kasvaessa. Funktiot ilmaisevat sen kuinka suuria taajuuksia kuvasysteemi (painatus, näyttökuvaus) kykenee erottelemaan. Funktioiden etuna on se, että ne kertovat kuinka hyvin systeemi toimii koko skaalalla pienistä suuriin spatiaalisiin variaatioihin. /38/

5.2 MTFA

MTFA (Modulation Transfer Function Area) on mitta monitorin kyvyille esittää ja silmän kyvyille detektoida sinikäyräsignaali. Sinikäyräsignaalia pidetään symbolien ja kuvien peruselementteinä. Jos näytön spotin muoto on Gaussinen tai quasi-Gaussinen voidaan näytön MTF laskea kaavalla 19 /19/:

$$M(u) = e^{\left(-\pi^2 s^2 u^2 / 4 \ln 2\right)} \quad (19),$$

jossa

u = spatiaalitaajuus (cycles/cm) ja

s = CRT spottikoko (cm)

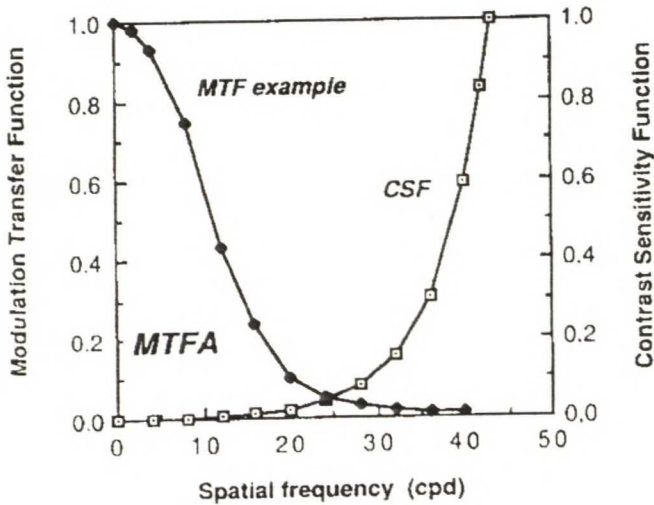
Silmän kykyä havaita siniaaltokäyrät (se modulaatiotaso, joka tarvitaan havaintoon paikkataajuuden funktiona) kutsutaan CSF-käyräksi (Contrast sensitivity function). Korkeilla taajuuksilla, silmän CSF voidaan aproksimoida kaavalla 20 /19/:

$$CSF(u) = g e^{(\partial \pi L u / 180)} \quad (20),$$

jossa

$$\begin{aligned} g &= 7,65E-04 \text{ ja} \\ \partial &= 0,166^\circ \\ L &= \text{katseluetäisyys} \end{aligned}$$

MTFA on laskennallisesti näytön MTF:n ja silmän CSF-käyrän rajoittaman alue. Ku-
vassa 15 on tyypillinen näytön MTFA tietyssä spesifisessä ulkoisessa valaistuksessa.



Kuva 15. MTF-käyrän ja CSF-käyrän (> 10 Cd/m²) leikkauspisteessä näytön modulaatiokонтрасти on silmälle niin alhainen, että silmä ei kykene detektoimaan testikuvion (siniaaltainen luminanssikuvio) korkeampia taajuuksia./16/

Kaavassa 21 on esitetty MTFA:n laskenta:

$$MTFA = \int_0^{u_{\max}} |MTF(u) - CSF(u)| \quad (21)$$

jossa

$$\begin{aligned} MTF(u) &= \text{näytön MTF,} \\ CSF(u) &= \text{silmän kontrastinherkkyysfunktio ja} \\ u &= \text{kulman spatiaalitaajuus havainnoitsijan silmässä} \end{aligned}$$

U_{\max} pätee, jos $M(u_{\max}) = M_t(u_{\max})$. Tämä perustuu oletukseen, että näkökynnyksen ylittävät paikkataajuudet eivät vaikuta visuaaliseen havaintoon. ANSI standardin /1/

mukainen minimilaatukriteeri pätee kun MTFA on ≥ 5 . Toisaalta lähteen /19/ tutkimuksessa on päädytty $MTFA \geq 7$, ANSI standardin mukaista näytön laatuvaatimusta pidetään riittämättömänä. Infante on tutkimuksessaan /19/ vertaillut erilaisia MTFA:n numeerisia laskutapoja päätynyt siihen, että ANSI/HFS 100 MTFA:n laskenta tapa on virheellinen.

5.3 ICS

Käytännössä MTFA- metriikassa korkeilla spatiaalitaajuuksilla on suurempi painokerroin kuin matalilla taajuuksilla. Lisäksi $M_t(u)$:n ja $M(u)$: vähennyslasku ei ole konvoluutioteoreeman mukainen. Ehdon toteutumiseksi muuttamalla mittalukujen erotus suhteeksi saadaan mittasuure ICS, integroitu kontrastinherkkyys (kaava 22):

$$I = \int_0^{\infty} \frac{M(u)}{M_t(u)} du \quad (22)$$

Silmän kontrastinherkkyys on silmän optisen MTF:n ja näköhermosysteemin kontrastin herkkyyden tulo. Näin ICS:n laskennassa näytön MTF on kerrottu silmän MTF:llä, mikä ei ole ristiriidassa optisen konvoluutiosäännön kanssa./4/

5.4 SQF

SQF (Subjective Quality Factor) on metriikka kuvasysteemin laadulle. Tässä metriikassa silmän kontrastinherkkyysfunktio on yksinkertaistettu suorakaidefunktioksi (kaava 23):

$$SQF = \int_{u_1}^{u_2} M(u) d(\ln u) \quad (23)$$

$SQF = 1$, jos $u_1 = 3 \text{ cycles/}^\circ$ ja $u_2 = 12 \text{ cycles/}^\circ$, muuten alueen ulkopuolella $SQF = 0$. Logaritmisien integroinnin avulla saavutetaan parempi tasapaino matalien ja korkeiden spatiaalitaajuuksien kesken. Niin ICS kuin SQF olettavat silmän reagoivan luminanssi-signaaliin lineaarisesti./4/

5.5 SQRI

SQRI (Square Root Integral) on silmän epälineaarisen käyttäytymisen huomioivan kuvasysteemin laatumetriikka (kaava 23):

$$SQRI = \frac{1}{\ln 2} \int_0^{u_{\max}} \sqrt{\frac{M(u)}{M_l(u)}} \frac{du}{u} \quad (24)$$

jossa

u_{\max} = maksimi spatiaalikulma resoluutio annetulla osoitetulla taajuudella

SQRI ilmaisee näytön kuvanlaadun JND (Just noticeable difference), jossa 1 jnd on määritelty annettuna 75 % oikeana responssina kahden vaihtoedon pakotetussa vaihtoehtokokeessa, vastaten 50 % havaintotodennäköisyyttä. 1 jnd:n muutos kuvasysteemin laadussa pidetään käytännöllisesti merkityksettömättömänä, 3 jnd:n muutos on merkittävä ja 10 jnd:n muutos on huomattava. /4/

5.6 S

Kontrastiherkkyysfunktio on matemaattinen esitys standardihavainnoijan silmän kontrasti herkkyydelle. Kontrastiherkkyys kuvaa silmän kykyä havainnoida pieniä luminanssimuutoksia. Kontrastiherkkyysfunktio ottaa huomioon näytön luminanssiin ja näytön koon. Kaavassa 25 on funktion matemaattinen esitys.

$$S(u) = \frac{1}{M_l(u)} = au \exp(-bu) \sqrt{1 + c \exp(bu)} \quad (25)$$

jossa

$$a = \frac{540 \left(1 + \frac{0,7}{L}\right)^{-0,2}}{1 + \frac{12}{w \left(1 + \frac{u}{3}\right)^2}},$$

$$b = 0,3 \left(1 + \frac{100}{L}\right)^{0,15},$$

$$c = 0,06,$$

u = spatiaalitaajuus ilmaistuna cycles/degree (cpd) ,

w = näytön kulmakoko ilmasituna asteina, laskettuna kuvaalueen neliönä,

L = näytön tehollinen luminanssi ilmaistuna Cd/m²

Kaavassa suure "a" kuvaa kontrastinherkkyys funktion matalien taajuuksien käyttäytymistä ja b ja c korkeiden taajuuksien käyttäytymistä. Suure b riippuu tarkastelijan näön terävyydestä. Kontrastinherkkyys laskee keskiluminanssin laskiessa kaikilla paikkataajuuksilla /4,34/

6 VISUAALINEN KUVAN LAATU JA SEN MITTAUS

Kuvan visuaalinen laadulla tarkoitetaan sen antamaa laatuvaikutelmaa. Kuvan laatuarvosteluun vaikuttavat teknisen laadun lisäksi sekä ihmisen näköjärjestelmän ominaisuudet että korkeantason havaintopsykologia eli opitut asiat ja asenteet /34/. Subjekttiivinen laatu eli visuaalinen laatu voidaan jakaa ekvivalenssiin laatuun ja yleiseen laatuun. Ekvivalenssi eli toistoprosessin laadunmittauksessa kuvan subjektiivista laatua arvostellaan verrattuna alkuperäiseen kohteeseen (kuvaorginaali, paperi). Kun arvostelu tehdään ilman preferenssiä, kysymyksessä on yleinen laatu. /47/ Tässä tarkastellaan subjektiivisista laatusuureista kiiltoa ja parivertailumenetelmää visuaalisen laadun arviointimenetelmänä.

6.1 Visuaalinen kiilto

Visuaalinen kiillon tason havainnointi perustuu näköjärjestelmän saaman informaatioon pinnan ja sen ympäristön heijastusjakaumista. Täten kiilto edellyttää paikallista luminanssvaihtelua. Pinnan kiiltohavainto voi perustua gradienttioperaatioon. Pinnan päätellään olevan kiiltävä, kun luminanssigradiendi on suurempi kuin mitä se on pinnan muista tekijöistä kuten pinnan muodosta johtuen. Luminanssi vaihtelun yhtenä tekijänä esim. arviointitilanteessa on se, että koehenkilöt mielellään kääntelevät näytettä eri kulmiin. /34/

Luminanssigradienntiteorian on kehittänyt Forbus vuonna 1977 . Teoria perustuu ajatukseen siitä, että kiilto on valonlähteen peilikuva (virtuaalikuva) ts. heijastuma. Teoriassa sovelletaan valonlähteen identifioimiseen tarkoitettua S-operaattoria. S-operaattori voidaan laskea kaavalla 26:

$$S = L_1 - L_2 \left(\frac{G_1}{G_2} \right) + G_1 d \quad (26),$$

jossa

$L_{1,2}$ = luminanssi pisteessä 1 tai 2,

$G_{1,2}$ = gradientti pisteessä 1 tai oikealla 2 ja

d = mittauspisteiden 1 ja 2 välinen etäisyys

S-operaattori ilmaisee oletetun valonlähteen/virtuaalikuvan intensiteetin. Kaava pätee, jos pintaan kohdistuu lineaarinen illuminanssigradietti. Tällöin vierekkäisten alueiden luminanssien suhde = gradienttien suhde. Pinnassa esiintyy valonlähde tai kiilto, jos luminanssien suhde on suurempi kuin gradienttien suhde. S-operaattorin määritelmä, joka ottaa huomioon pintojen 1 ja 2 erilaisen orientaation, on esitetty kaavassa 27:

$$S = L_1 - L_2 \left(\frac{G_1}{G_2} \right) \left[\frac{\cos(e) \sin(i + \alpha)}{\cos(e + \alpha) \sin(i)} + G_1 d \left[\frac{\cos(e)}{\sin(i)} \right] \right] \quad (27),$$

jossa

e = katselukulma,

i = valon tulokulma ja

α = pintojen 1 ja 2 orientaatioiden välinen kulma

Huomattavaa on se, että s-operaattorin käyttö edellyttää lineaarista illuminanssigradienttia. /38/

6.2 Parivertailu

Parivertailussa testinäytteitä verrataan keskenään systemaattisesti. Parivertailun tavoitteena on usean henkilöiden arvostelujen perusteella löytää objektiivisiin laatumittoihin sidonnainen järjestys. Menetelmää voidaan soveltaa aina kun kohteet voidaan esittää pareittain (yhtäaikaan tai peräkkäin). Testikuvien määrä tulisi olla < 15 kpl, suuremman määrät vähentävät koetilanteessa koehenkilön suorituskyykyä (väsyminen, pitkäkestoaika). Jos esimerkiksi testihenkilö arvostelee n kappaletta kuvia on arvostelu kombinaatioiden lukumäärä $N(N-1)/2$. Testitulanteessa arvostelijan mielipiteeseen vaikuttavat eikuvasta riippuvatekijät tulee minimoida eli koejärjestely tulee rakentaa mahdollisimman vakiolliseksi (paperien tausta, valaistusolosuhteet ja katseluetäisyys tunnettu ja määrätty). Parivertailussa saatuja tuloksia voidaan analysoida MDS-analyysiin tai näytteiden pisteytykseen perustuen. Analysointimenetelmän valinta riippu käytetystä koejärjestelystä.

6.2.1 MDS-analyysi

MDS-analyysi on tilastoanalyysiin perustuva tekniikka, joka suorittaa koehenkilöiden testinäytteiden parivertailussa tekemien päätöstekijöiden erottelun ja identifioinnin /28/. MDS-analyysissa näytteiden havaitut erot esitetään näytteiden välisenä fyysisenä etäi-

syytenä. Näytteiden väliset erilaisuudet erotetaan kuvan 16 kaltaisella lineaariasteikolla. Skaalan arvoja voidaan käyttää etäisyyksinä rakennettaessa näytteiden välisten suhteiden konfiguraatiomalli useammassa kuin yhdessä dimensiossa.

Samanlainen-----X-----Erlainen

Kuva 16. Paperivertailussa käytettyvä lineaarinen mitta-asteikko. Kokeenjohtaja asettaakoehenkilölle arvosteltavaksi vertailtavat paperit pareittain satunnaisjärjestyksessä. Koehenkilö arvio kunkin parin samakaltaisuutta / erilaisuutta asettamalla merkin adjektiivien väliselle janalle. Merkkien paikka mitaan janalla, jolloin saadaan kullekin vertailutilanteelle alfanumerinen indeksi.

Näytteiden väliset etäisyydet voidaan muuttaa multidimensionaaliseksi konfiguraatioksi Ramsay:n mallin avulla (kaava 28)./26/

$$d_{ij} = V \left[\sqrt{\sum_m (X_{im} - X_{jm})^2} \right]^p \quad (28),$$

jossa

d_{ij} = näytteiden i ja j:n välillä havaittu ero,
 X_{im} ja X_{jm} = i ja j:n koordinaatit m:sä dimensiossa,
 V ja p = skalaari ja potenssi korjaukset

Dimensioiden määrittämiseen MDS-analyysissä voidaan käyttää erilaisia kriteereitä, joista yleisesti käytössä on log-likelihood-funktion maksimointi. Log-likelihood funktio määritellään ehdollisen todennäköisyysfunktion logaritmin summana yli näyte- ja arvostelijoukon (kaava 29):

$$\log L = -M \frac{(1 + \log s^2)}{2} \quad (29),$$

jossa

M = arvosteltujen parien ij kokonaismäärä,
 s^2 = estimaatti keskivirheelle

Estmaatti s^2 lasketaan seuraavasti (kaava 30):

$$s^2 = \sum_{ij} \frac{(d_{ij} - d^*_{ij})^2}{(M - Q)} \quad (30),$$

jossa

- Q = mallin parametrien lukumäärä,
 d_{ij} = näytteiden i ja j välillä havaittu ero,
 d^*_{ij} = mallin ennustama i ja j:n välinen ero

Dimensioiden X_{im} määrittäminen tapahtuu iteratiivisesti. Iterointi suoritetaan dimensioiden eri lukumääriä. Parhaiten koeaineiston selittävä malli määritetään tilastollisen testauksen avulla. Testisuurena on k- ja (k-1)- dimensioiden mallien log-likelihood kerrottuna kahdella. Hypoteesi k-dimensioiden malli on parempi luottamustasolla α hylätään jos testisuure (kaava 31)/28,34/:

$$2[(\log L)_k - (\log L)_{k-1}] > \chi^2(n-k) \quad (31),$$

jossa

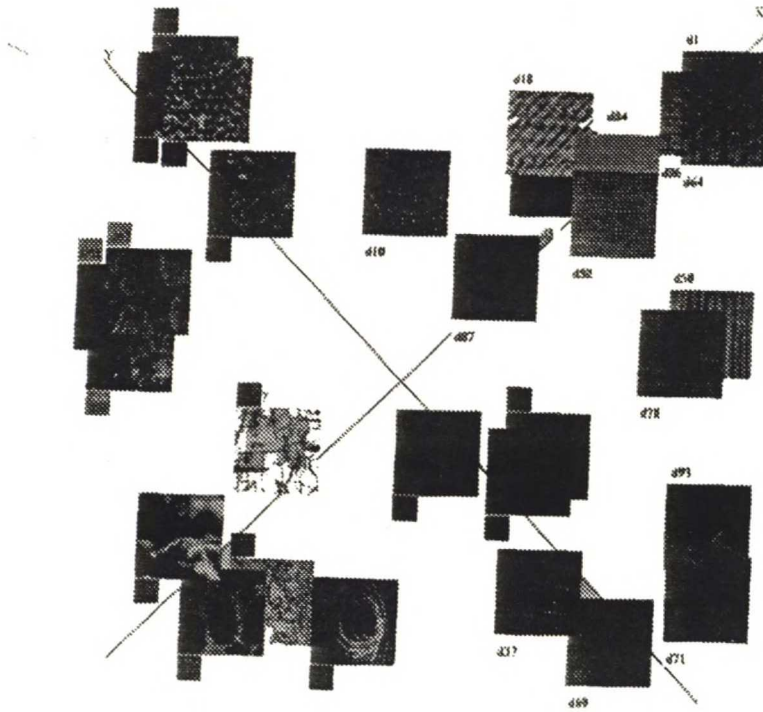
- $\chi^2(n-k)$ = χ -jakauman arvo vapausasteilla n-k,
n = näytteiden lukumäärä

Taulukossa 5. on esimerkki log-likelihoodtestauksesta.

Taulukko 5. Dimensioiden lukumäärän valinta, kun näytteiden määrä n=14 ja luottamustaso 0,95.

Dim. (k)	Log- likelihood	Vapausasteet (n-k)	Testisuureen arvo $\chi^2 = 2[(\log K)_k - (\log L)_{k-1}]$	$\chi^2, p = 0,05$
1	40,3	(14-1)=13	-	-
2	54,2	(14-2)=12	(54,2-40,3)x2 = 27,8	21,0
3	59,5	(14-3)=11	(59,5-54,2)x2 = 10,6	19,7

MDS-analyysin perusteella on mahdollisuus saada tietoa mm. siitä, mitä ominaisuuksia koehenkilö arvostaa verratessaan näytteiden erilaisuutta/samankaltaisuutta. Analysoitavat dimensioiden ilmaisevat päätöskriteereiden määrää. Esim. jos MDS-analyysi tukee papereiden testauksessa 3-dimensiota, voi koehenkilöiden mahdollisia päätöskriteereitä olla esim. paperin kiilto, pintarakenne ja vaaleus. Dimensioiden saadaan selville papereista mitattujen laatuominaisuuksien ja dimensioiden välisellä yhden tai useamman muuttujan regressioanalyysillä. Dimensioiden koordinaattien avulla voidaan piirtää konfiguraatiomalli, jonka koordinaatti akselit edustavat dimensioille löydettyjä laatuominaisuuksia (kuva 17). Huomattavaa on se, että akselit eivät ole välttämättä ortogonaaliset.



Kuva 17. Ravishankar Raon tutkimuksessaan löytämät dimensiot erilaisille tekstuurirakenteille./45/

6.2.2 Pistesumma-analyysi

Pistesumma-analyysissä koehenkilöiden pisteyttämien näytteiden luokitus tapahtuu näytteiden saaman pistesumman perusteella. Kun arvosteltavia näytteitä on N -kappaletta lasketaan pistesumma (kaava 32):

$$R_{ij} = \frac{1}{N} \sum_j r_{ij} \quad (32),$$

jossa

r_{ij} = näytteiden pistemäärä, jonka arvostelija j antaa näytteelle i ,

$$\sum r_{ij} \leq nN$$

N = arvostelijoiden lukumäärä

Arvostelijat vertaavat näytteitä pareittain. Parempi saa vertailussa pisteen. Pistesumma $r_{ij} = 0 \dots n-1$ ilmoittaa laadun $n-1$ ollessa paras. Lasketaan laatuarvosana p_i (kaava 33)/9,34, 54/:

$$p_i = \frac{100}{n} (R_i - 0,5) \quad (33)$$

jossa

n = näytteiden lukumäärä,

$$0 < p_i < 100$$

Yleisiä pisteytysmenetelmiä ovat

1-0, 0-1, jossa parin voittaja saa yhden pisteen. Pisteytyksen heikkoutena on se, että koehenkilö pakotetaan antamaan piste, tasapeliä ei tunneta.

2-0,0-2,1-1, pistetyksessä voittaja saa kaksi pistettä, tasapelistä saa yhden pisteen.

Parit voidaan pisteyttää taulukon 6 mukaisesti.

Taulukko 6. Pisteytys (2-0, 0-2, 1-1)-menetelmällä. Parin voittaja saa 2 pist. Häviäjän saadessa 0 pist. Tasapelistä molemmat saavat 1 pisteen.

	Paperi X	Paperi Y	Paperi Z
Paperi X	-	0	0
Paperi Y	2	-	1
Paperi Z	2	1	-
Summa	4 pist.	1 pist.	1 pist.

7 PAINOJÄLJEN VISUALISOINTI CRT-NÄYTÖLLÄ

Luvuissa 8 ja 9 tarkastellaan teorian kannalta visualisointijärjestelyä, jossa näytöllä visualisoitava kohteen syöttö tapahtuu CCD-kameralla digitoimalla.

8 DIGITOINTI

Kuvan syöttölaite on elektroninen laite, joka kykenee muuttamaan valon kaksidimensio-naalisen jakauman yksidimensionaaliseksi elektroniseksi signaaliksi. Digitoinnilla tarkoitetaan tässä kohteen optista detektiota, optisen detektion muuntaa analogiseksi/videosignaaliksi ja analogisen/videosignaalin muuntaa tietokoneen ymmärtämään digitaaliseen esitykseen.

Kuvalla tarkoitetaan tässä kaksidimensionaalista intensiteettifunktiota $I = f(x,y)$, jossa x ja y ovat paikkakoordinaatteja ja f arvo pisteessä (x,y) on verrannollinen kuva harmaata-soon tässä pisteessä. Digitaalisessa kuvassa funktio $f(x,y)$ on diskretisoitu niin koordi-

naatien kuin harmaatasojenkin suhteen. Kaavassa 34 on esitetty värikuvan kuvafunktio vektoriesityksenä.

$$\vec{f}(x, y) = (f_{red}(x, y), f_{green}(x, y), f_{blue}(x, y)) \quad (34)$$

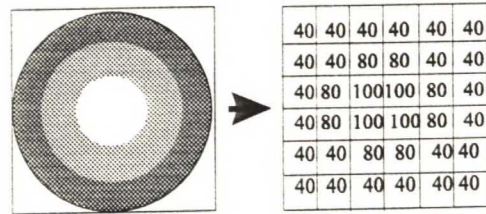
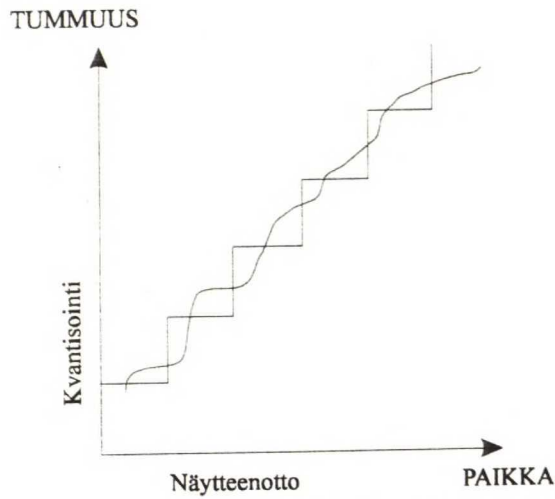
Digitoinnissa optisesta sigaalista otetaan näytteitä tietyin, tasaisin välein, jotka määräytyvät optisesta suurennuksesta, käytettävän sensorin tarkkuudesta(ccd- kennossa kuvaelementtien lukumäärästä/pinta-alayksikkö). Näytteenotossa määritellään näytteenottoväli(määrittelee kuvan resoluution eli erottelukyvyn) ja näytteen-ottopisteiden sijainnin tasossa (tessalaatio). Näytteenottoteorian mukaan signaali, jonka kaistanleveys on B jaksoa/ pituusyksikkö voidaan rekonstruoida eksaktisti, kun näytteenottotaajuus on 2B näytettä/pituusyksikkö. Näytteenoton jälkeen signaali kvantisoidaan l. signaalin sävytasot kvantisoidaan tietyille tummuustasoille. Määritellään mitä eri arvoja kuvafunktiolla voi olla eli kuvaesityksen harmaatasot.

Kahdeksan bitin systeemissä signaalilla on 2^8 (256) sävytasoa, kun kukin pikseli on koodattu 12 bitillä on sävytasojen lkm 4096. Väriesityksessä, jossa kukin RGB-komponentti on koodattu 8 bitillä/pikseli, on sävytasojen lkm 16,7 milj. ($2^8 \cdot 2^8 \cdot 2^8$). Koska kvantisoinnissa jatkuvassa tapauksessa asetetaan vakioarvo vastaamaan äärellistä väliä, syntyy kvantisointikohinaksi kutsuttu virhe(taulukko 7).

Taulukko 7. Kvatisointikohina

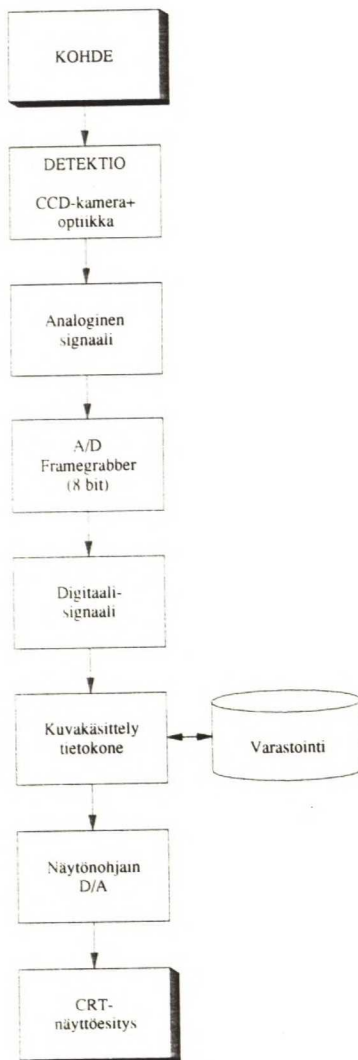
bit/pikseli	S/N-suhde	S/N[dB]
2	14	23
3	28	29
4	55	35
8	890	59
10	3550	71
12	4200	83

Digitaalinen kuvasignaali on siis kaksidimensioinen kuvataulukko. Kuvassa 18 on esitettyä kuvan digitalisointi. Saadusta digitaalisesta kuvaelementistä käytetään nimitystä pikseli (pixel = picture element)./47, 50, 11/



Kuva 18. Signaalin digitalisointi

Seuraavassa tarkastellaan niitä kuvan 19 kaltaisessa digitointiprosessissa signaalin laatuun vaikuttavia tekijöitä systeemissä, jossa kuvasignaali visuaalisoidaan CRT-näytöllä.

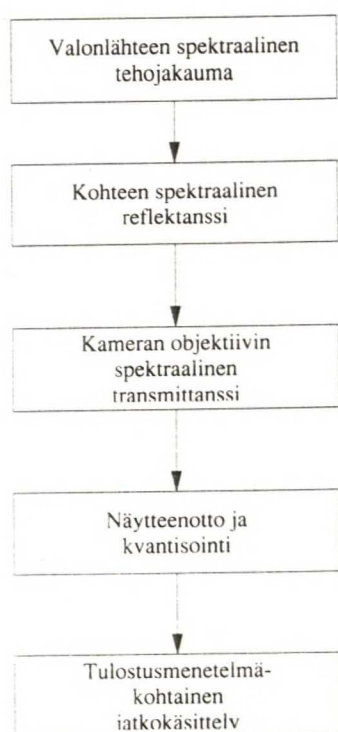


Kuva 19. CCD-kamera pohjainen signaalin syöttö ja sen digitointi CRT-näyttöesitystä varten.

Digitointisysteemissä kamera, joka muuttaa optisen signaalin sähköiseksi, on dominoiva kohinan ja signaalin vaihtelun lähde. Sähköinen signaali edustaa siis kameran kokonaisherkkyyden filtoimaa näkymää. Kokonaisherkyys taas muodostuu linssien, sensorien ja vahvistimien herkkyyksistä.

8.1 Digitoinnin laatusuureet

Digitointisysteemin laatusuureet on jaoteltu tässä kontrastinsiirtofunktion, dynaamiseen alueeseen, kohinaan, kameran spektraaliseen herkkyyteen ja resoluutioon. Näihin laatusuureisiin vaikuttavat kuvassa 20 mainitut tekijät.



Kuva 20. Monokromaattisen kamerasysteemin signaalin laatuun vaikuttavat tekijät

Ideaalisen kameran näkemään kohteesta voidaan mallittaa kaavan 35 avulla/32/:

$$m_i = \int L(\lambda) s_i(\lambda) d\lambda \quad (35),$$

jossa

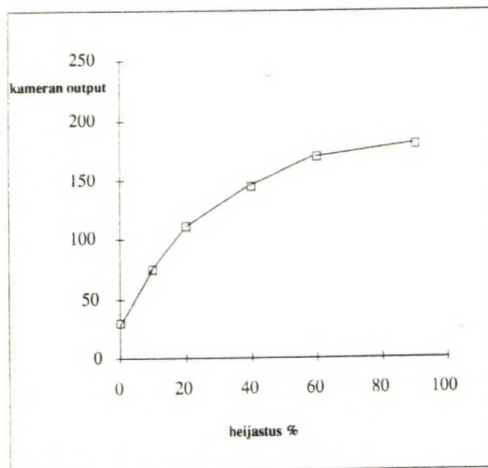
$L(\lambda)$ = se spektraalinen jakauma, joka saapuu kameraan tietystä pisteestä,

$s_i(\lambda)$ = sensorin spektraalinen herkkyys ja

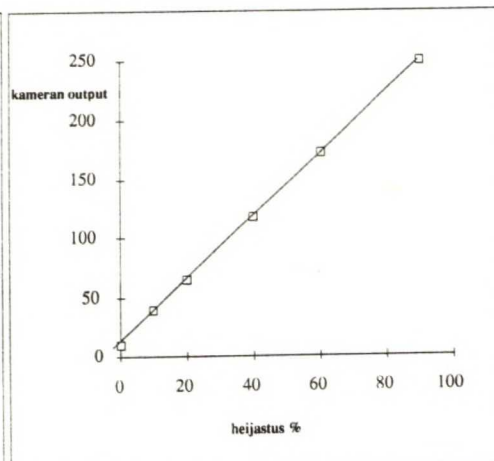
λ = aallonpituus

Kaavassa m_i on kameran antama arvo tietylle pikselille. Tyypillisesti RGB-kamerassa sensorien herkkyydet ovat jakaantuneet pitkille (R), keskipitkille (G) ja lyhyille aallonpi-

tuuksille(B) osittaisin allonpituuksien päällekkäisyyksin. Monoromaattisen kameran tapauksessa pikselillä voi olla vai yksi arvo , kun värikameralla jokaisella pikselillä on kolme rinnakkaista arvoa. Malli edellyttää kameran toimivan lineaarisesti (kuva 21 ja 22).



Kuva 21. kameran epälineaarinen responsi.



Kuva 22. Kameran lineaarinen responsi.

Kameran lineaarisuus säädetään gamma-kertoimella. Gamma-arvolla 1.0 systeemi on lineaarinen. Kameraan tulevaa valoa voidaan kuvata mallilla, jossa kameraan tulevan valon määrään vaikuttaa valaistus, kohteen heijastus ja orientaatio (kaava 36).

$$L_c(\lambda) = E(\lambda)\rho(\lambda)\cos(\lambda) \quad (36),$$

jossa

L_c = kameraan saapuva valo,

E = näkymän illuminanssi,

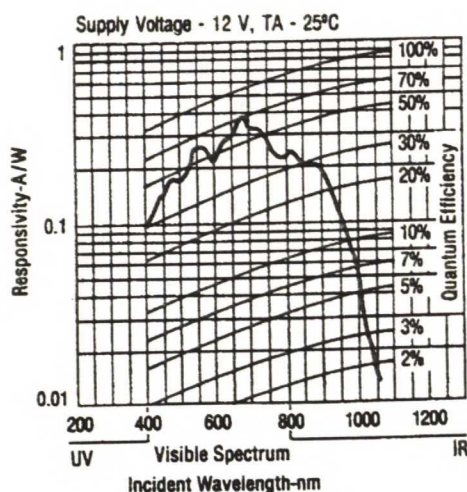
ρ = kohteen heijastus ja

$\cos(\lambda)$ = valon heijastuskulma

Mallin perusteella kameraan saapuva valo on riippuvainen kohteen valaisuun käytettävän valon spektraalisesta jakaumasta (vrt. hehkulamppu/halogeneeni), kohteen kyvystä heijastaa valoa ja kulmasta, joka kuvaa pinnan kirkautta, kun kohdetta käännetään pois päin valonlähteestä eli pinnan illuminanssi on suhteessa valon tulokulman kosiniin.

8.1.1 Spektraalinen herkkyys

Spektraalinen herkkyys määrittelee systeemin kyvyn toistaa originaalin värillisyyttä aallonpituuden funktiona eli herkkyys aallonpituuden funktiona hyvin kapealla aallonpituuskaistalla (tyypillisesti 400...700 nm). Kuvassa 23 on CCD-kameran(COHU 4710) valmistajan ilmoittama spektraalinen herkkyys (mittaus tehty värilämpötilassa 2850 °K)

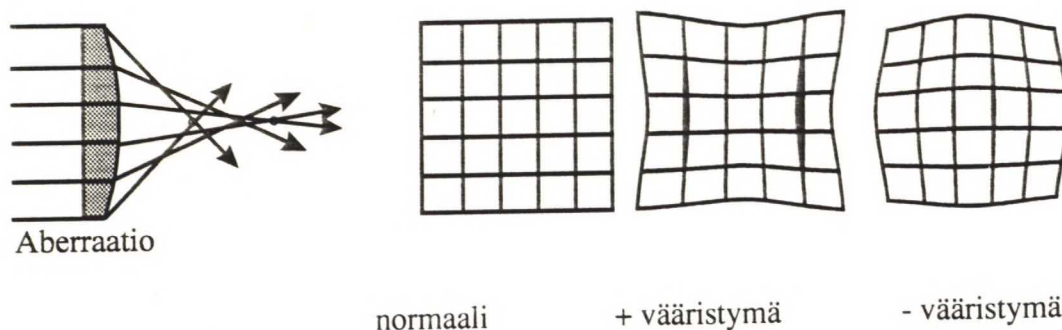


Kuva 23. COHU 4710 kameran spektraalinen herkkyys /51/.

Digitoinnissa systeemin spektraalinen herkkyys vaikuttavat valonlähteen spektraalinen tehojakauma (halogeenilamppu/hehkulamppu/standardivalonlähde), detektoivan kohteen spektraalinen reflektanssi (metalliväri/paperi) ja kameran kyky detektoida objektiivin kuvasensorille keräämä valonaallonpituusjakauma. Esimerkiksi jos kamera on herkkä IR-aallonpituuksille (700 nm ...1000 nm), kamera näkee asiota, joita ihmissilmä ei näe; värit vaikuttavat vaaleammilta ja vähemmän saturoivilta kuin ihmissilmä näkisi värit. Tämä voidaan korjata IR:n estofilterillä. /32,51/. Samoin kuin voidaan vähentää kameran herkkyttä tietyllä aallonpituus alueella, voidaan myös filterien avulla lisätä kameran herkkyttä puutteellisesti toistuvalla aallonpituusalueella. Esimerkiksi jos toisto sinisessä päässä on huono voidaan kameran spektraalinen herkkyys kertoa neutraali densiteetti filterin herkyydellä (Wratten 47B) ja näin korjata sinisen pään toistoa. Myös apetuurisäädöllä ja valonlähteen valinnalla voidaan vaikuttaa tietyn aallonpituusalueen toistoon.

8.1.2 Resoluutio

Resoluutiolla tarkoitetaan tässä kameran optisen suurennuksen ja sensorin kuvaelementtien kohteesta muodostaman kuvauksen tarkkuutta. Optisen systeemin monimuotoisuus on riippuvainen siitä, onko kyseessä RGB-kamera vai monokromaattinen kamera. Monokromaattisen kameran linssisysteemin lisäksi värikameroissa on lisänä väriajakoprisma ja värinerottelusuotimet. Kameran toimivuuden kannalta linssin resoluution tulee olla parempi kuin kuvasensorin resoluutio. Monokromaattisilla kameroilla on usein korkeampi spatiaaliresoluutio kuin värikameroilla. Systeemin resoluutiota rajoittavana tekijöinä ovat linssisysteemin tapahtuva valon diffraktio, geometriset vääristymät, aberraatiot ja kromaattiset aberraatiot (kuva 24).



Kuva 24. Aberraation ja vääristymien vaikutus kuvan muodostukseen.

Resoluution tulisi olla kaksi suurempi kuin kuvattavan kohteen pienin yksityiskohta, jotta kuvaus voidaan toistaa ideaalisti.

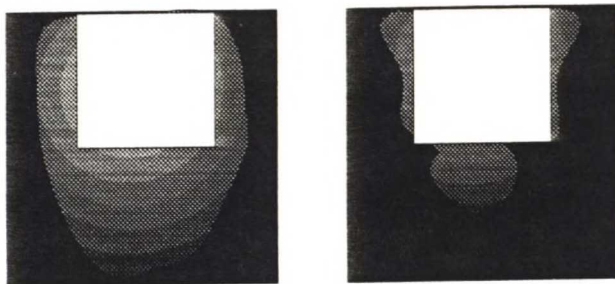
8.1.3 Kohina

Kohina yleensä kumuloituu prosessissa. Systeemin kohina digitoinnissa muodostuu kameran kohinasta (sensori, optiikka), elektronisen signaalin kohinasta ja kvantisoitinkohinasta. Tyypillisesti RGB CCD-kameroiden SNR-suhde on ~ 48 dB, monokraattisilla kameroilla SNR-arvo on parempi ~ 50 dB. Kameroiden kohinaa voidaan pienentää jäähdyttämällä kuvasensori, tällaisella kameralla päästään $\text{SNR} > 60$ dB. Jäähdytettyjen kameroiden haittana on tällä hetkellä korkea hinta (~ 100000 FM). Taulukkon 8 on listattu markkinoilta saatavien erilaisten CCD-kameroiden S/N-arvoja.

Taulukko 8. CCD-kameroiden SNR-arvoja (valmistajan ilmoittamia).

Kamera	Väriesitys	S/N [dB]	Jäähdytys
SONY/XC-75CE	MONO	56	EI
SONY/XC-999P	RGB	46	EI
Hamamatsu/C4742		>60	ON
i2S/iV800 BC	MONO	50	EI
i2S/iE800 CCRGB		48	EI
COHU/6712	MONO	55	EI
COHU/6812	RGB	50	EI
COHU/4712	MONO	50	EI
JVC TK-1070E	RGB	47	EI
JVC KY-F30E	RGB	55	EI
PHILIPS LDH 646	RGB	>47	EI
TMC-60	RGB	45	EI
TMC-86	MONO	50	EI

Eräs kameran haitallinen kohinan lähde voi olla kuvasensorin pikselien "kukkiminen" (blooming, kuva 25).



Kuva 25. Blooming efekti tilanteessa, jossa valkoinen kortti on kuvattu mustalla taustalla. Vasemman puoleisessa kuvassa voimakasta kukkimista, oikeanpuoleisessa vähäisempää kukkimista.

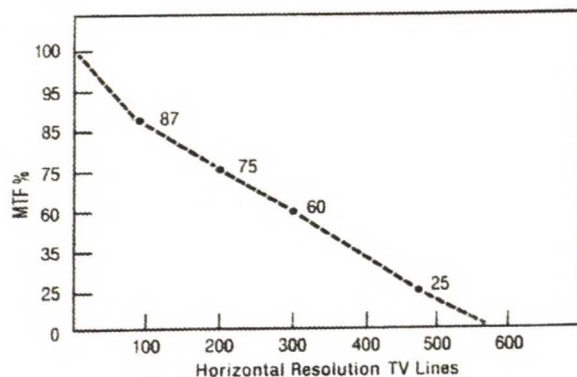
Yhden pikselin varauksen saturoidessa, varaus voi levitä naapurisoluihin vaikuttaen mittavaan arvoon. Tilanne on tyypillinen silloin, jos detektoitavassa kohteessa on suuria vaaleuseroja.

8.1.4 Dynaaminen alue ja CTF

Dynaaminen alue on se maksimi toistoalue, jonka systeemi kykenee toistamaan. Dynamiikan tunnuslukuna voi olla esim. densiteetti. Tällöin digitoinnin dynamiikka voidaan määritellä taajuuskohtaisesti maksimaalisena toistettavana densiteettialueena. Kameran dynamiikan säädössä digitoitavan kohteen kirkkain piste tulee olla detektoivissa kameran dynaamisella alueella. Sääto voidaan tehdä apertuurin ja /tai suljimen avulla.

Tämä on kuitenkin vaikeaa pinnoille, jotka sisältävät heijastumia (highlights). Heijastumat ovat yleensä kertaluokkaa suurempia kuin ei-heijasteiset alueet. Jos kameran dynamiikka säädetään näiden ei-heijasteisten pintojen perusteella seurauksena on signaalin saturointi heijasteisilla alueilla. Tilanne on myös ongelmallinen, jos dynamiikka säädetään heijastumien perusteella. Tällöin ei-heijasteiset pinnat ovat niin tummia, että voidaan puhua jo kameran kohinan tasosta. Signaalin saturointi näkyy esim. värikameroissa sävysiirtymänä.

Digitointisysteemin yksityiskohtien toistokyvynmitta eri taajuuksilla on systeemin CTF. Diplomityössä käytetyn CCD-kameran valmistajan ilmoittaman MTF % suhteessa resoluutioon (vaakasuorien TV-linjojen määränä) on esitetty kuvassa 26 (mittaus tehty värilämpötilassa 2850 °K).



Kuva 26. Valmistajan ilmoittama CCD-kameran sinikäyräsignaalista mitattu

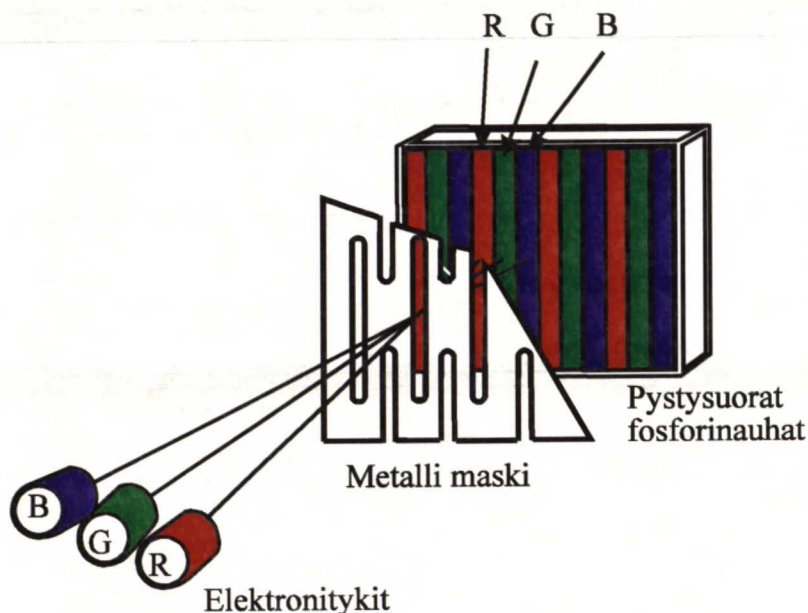
MTF./62/

Digitointisysteemin CTF muodostuu kameran+optiikan CTF:n ja A/D-konversion CTF:n tulosta. Systeemin CTF voidaan mitata taajuuden mukaan muuttuvasta palkkikuviosta.

9 CRT- NÄYTTÖ

CRT-pohjaisen visualisoinnin pääyksikön muodostaa RGB-monitori. Visualisoinnin kannalta näyttö on kyettävä kalibroimaan vakiolliseen tilaan väriesityksen, mittausten ja testien realisuuden, vakiollisuuden ja toistettavuuden mahdollistamiseksi.

CRT-näyttöjärjestelmäkokonaisuus muodostuu näyttöyksiköstä (CRT= Cathody Ray Tube) ja näyttöyksikön ohjauksen hoitavasta näytönohjaimesta, joka muuttaa käyttäjän antamat digitaalimuotoiset komennot näytön ymmärtämissä analogisiksi signaaleiksi (DAC=digital to analog converter). Katodisädeputki on tyhjöputki, jonka toisessa päässä on elektronilähde ja vastakkaisessa fluoresoiva fosforipinta (kuva 27). CRT- näyttö luo kuvauksen skannaamalla näytön pintaa spottilla nopeudella, joka luo efektin valaistusta pinnasta. /56/. Elektronitykki(t) generoi spotin fokusoimalla elektronisäteen fosforipäällysteiselle näytön sisäpinnalle. Elektronisäde poikkeutetaan ja ohjataan sähkö- tai magneettikenttien avulla kuvapinnalle



Kuva 27. CRT-monitorin toimintaperiaate.

SMPTE:n T14.24 työryhmän on RP(Recommend Practice)-dokumentissa spesifoinut tyyppi A monitorin kalibrointia ja laatua. Seuraavat määritteet on annettu tyyppi A monitorille ammatilais-/studiokäyttöön /22/:

1. Kolmen SMPTE tyyppi C primäärifosforin värikoordinaatit (SMPTE värinäyttö tyyppi C):

Red	$x = 0,630$	$y = 0,340$
Green	$x = 0,310$	$y = 0,595$
Blue	$x = 0,155$	$y = 0,070$

2. Näytön valkoisen värilämpötila säädetty illuminantin D65 mukaan, $T = 6500 \text{ K}$:

$$x = 0,3127 \quad y = 0,3291$$

3. Maksimi väripoikkeama ei saa olla $> 6 \Delta C^* \text{ CIELUV}$ yksikköä mitattuna näytön keskipisteestä $0,15 \text{ fL}$:sta referenssi valkoiseen. Tämä vastaa noin kolminkertaista kokeneen tarkailijan havaitsemaa minimivärieroa.

4. Näytän luminanssimaksimi säädetty $35 \text{ fL} = 120 \text{ Cd/m}^2$

5. Valkoisen kentän tasaisuus:

Puhtaus: maksimi symmetrinen poikkeama $6 \Delta C^* \text{ CIELUV}$ yksikköä,

Luminanssi: symmetrinen muutos maksimissaan 25 % yli kuva-alueen ja

Valkoisen värillisyyys: symmetrinen muutos maksimissa $6 \Delta C^* \text{ CIELUV}$ yksikköä

6. Geometria: Lineaarisuus 1% kuvan korkeudesta

7. Spottikoko

19" näytöllä maksimissa 0,40 mm

13" näytöllä maksimissa 0,32 mm

8. Resoluutio minimissään 500 TV linjaa/kuvankorkeus 35 fL:ssa. CRT on kyettävä käsittelemään 8 MHz:n videosignaalia.

9. Näytön gamma tulee olla välillä 2.2 + 0.4, -0,0 yli luminanssialueen (40:1)

10. Kontrastisuhde minimissä 50:1 katseluoloissa

11. Kuvan stabiilisuus:

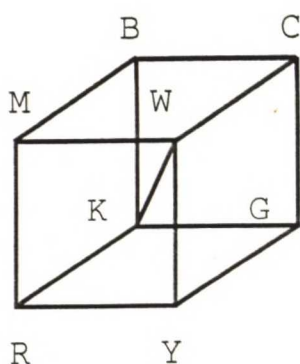
	luminanssi	RGB
lyhytaikainen:	2%	2%
pitkäaikainen:	1%	1%

9.1 CRT:n laatutekijät

9.1.1 Värillisyyys

Värin täydellinen toistaminen edellyttäisi valon amplitudin toistamista kullakin valonaallonpituudella. Tämä on teknisesti hyvin hankalaa. Silmän ominaisuuksista johtuen käytännössä riittää, että värintoistoon käytetään vain kolmea osa-aluetta näkyvältä valonaallonpituusalueelta (RGB)/58/.

Additiivinen eli summaava RGB-malli (R= red, G= green ja B= blue) on yleinen televisiossa ja tietokonemonitoreissa käytetty värimalli. Malli voidaan esittää kuvan 28 mukaisessa karteerisen koordinaatiston avulla. Mallin kolme pääväriä ovat additiivisiä eli värien kontribuutioita voidaan laskea vektoraalisesti yhteen. Käyttämällä normalisoituja muuttujia RGB-malli määrittelee yksikkökuution, jonka päälävistäjä (jokaisen komponentin osuus yhtäsuuri) esittää harmaan eri sävyjä./11/



Kuva 28. RGB-malli, jossa C = syaani, M= magenta, Y= yellow, R= red, G = green, B = blue, W = white ja K = black.

Värikuvaputkessa on yleensä kolme elektronilähdettä (delta-putki tai inline-putki) ja erilliset fosforit punaiselle (R), vihreälle (G) ja siniselle (B) osaväriille. Trinitron-putkessa on vain yksi elektronitykki, jonka säde jaetaan sähköisellä prismalla kolmeen osaan. Fosforit ovat jaettu joko pistemäisiksi (delta-putki) tai nauhamaisiksi muodostelmiksi. Trinitron-putkessa nauhat ovat pystyssä, kun inline-putkessa nauhat ovat vaaka-asennossa. Kunkin osaväriin elektronisuihku ohjataan oikeaan fosforiin metallimaskin avulla (Shadow mask), elektronien energiaa säätämällä tai säteen paikan takaisinkytkennällä./56/ Näytön primäärifosforien spektraalinen herkkyys määrittelee sen värispektrin, joka voidaan toistaa näytöllä (taulukko 9). Myös käytettävien fosforien sammumisaika vaikuttaa näytön värintoistoon.

Taulukko 9. Eri tyyppisiä näyttöfosforeita ja näiden sammumisaikoja.

Sammumisaika (ms)

Fosfori tyyppi	Väri	10 % kirkkauteen	1% kirkkauteen
P1	vihreä	24	50
P4	valkoinen	0,15	0,9
P20	keltainen	6,5	16
P22 G	vihreä	6	16
P22 B	sininen	4,8	17
P22 R	punainen	1,5	23
P31	vihreä	7	19
P38	oranssi	1100	

Näytöllä tulee olla tietty referenssivalkoisen värillisyyteen perutuva värillisuus. Referenssivalkoisen spektraalinen jakauma näytöllä määritellään RGB-eletronitykkien suhteellisella vahvistuksella (tarkemmin selvitetty kappaleessa 9.2).

Värinäytöllä kolmen elektronitykin kohdistuksen määrittelee näytön konvergenssi. RGB-elektronisäteiden konvertoidessa ne kohtaavat toisensa tasomaisella varjomaskilla. Jos säteet eivät konvergoi on seurauksena fosforipinnalle muodotuvan spotin ympärillä epämääräisiä väriläikkiä (fringes). Tämä vaikuttaa haitallisesti näytön värinmuodostukseen./21/

9.1.2 Resoluutio

Näytön resoluutio on mitta näytön kyvyllä esittää pienin erotettava yksityiskohta. Näytön resoluutio voidaan määritellä fosforipisteiden kokona, pitch kokona, spottikokona,

elektronisäteen fokuksena, vahvistimen kaistanleveytenä, TV-linjojen määränä ja modulaation siirtofunktiona (MTF) .

Kun monitori osoittaa yksittäisen pikselin lokaation, määritellään monitorin pinnalle projektoidun säteen spotin leveys ja korkeus spotin kokona. Spotin koko on täten mitta pienimmälle visuaalisesti erotettavalle ja mitattavalle yksityiskohdalle. Mitä suurempi sädevirta on ja mitä kirkaampi kuva, sitä enemmän säde defokusoituu kasvattaen spotin kokoa./12/

Värimonitoreissa, joissa RGB-fosforit ovat vierekkäin linjassa, kahden lähimmän samanvärisen fosforin keskilinjan etäisyyttä toisistaan kutsutaan "dot pitch". Spotin koko on aina suurempi kuin "dot pitch", koska säde osuu useaan fosforitrioona (RGB) ja tuottaa täten pehmeäreunaisen kuvauksen, jota voidaan aproksimoida gaussisella jakaumalla. Tyypillinen pitch koko tietokonemonitoreilla on 0,31 mm tai vähemmän; tyypillinen spottikoon ollessa 0,5-1,0 mm. /12/ Spottikoon pitäisi olla suurempi kuin osoitettava pikselikoko ja osoitettava pikselikoko pitäisi olla suurempi kuin "dot pitch". Näytön resoluutio voidaan ilmaista myös dpi (Dots per inch), joka ilmaisee osoitettavien pikselien määrän per tuuma. Normaaleilla SVGA monitoreilla näytön resoluutio on noin 72 dpi, kun korkearesoluutioisilla näytöillä päästään noin 150 dpi:n.

Näyttöissä käytettävällä varjomaskilla on vaikutusta näytön laatuominaisuuksiin. Varjomaskirakenne laskee luminanssikuvion korkeiden taajuuksien modulaatiosyvyyttä. Häiriön suuruus riippuu taajuuskomponenttien ja fosforitripletin vaihe-eroista.

Paljon käytetty näytön laatuomitosmitta on näytön MTF, joka CRT-näytöllä on linjan luminanssiprofiilin Fourier-transformaatio spatiaalitaajuuden funktiona. Blume /7/ tutkimuksessaan on päätenyt siihen, että näytön MTF tulisi olla noin 0,7 yksikköä yli CRT-näytön informaation siirron takaamiseksi rasterimodulaation ollessa 0,035. Näytön MTF voidaan mitata näytölle generoidusta taajuuden suhteen vaihtelevasta sinikäyräsignaalista. Huomioitavana seikkana on se, että näytön spatiaaliresoluutio yleensä vaihtelee yli näyttöpinnan ja tällä on oma vaikutuksensa mittausten luetettavuuteen. Spatiaalitaajuuden mittana käytetään usein jaksoa/näkökulma, näkökulma ilmaiseen kohteen projektioon koon verkkokalvolla .

Näkökulma (A) = $\tan^{-1}(S_0/d_0)$. Silmän paikkataajuuden $u[\text{cpd}]$ ja näytön paikkataajuuden (f) välinen relaatio on : $u = \pi f / 180$, jossa l on katseluetäisyys.

Näyttöresoluution vaikutus kuvan subjektiiviseen laatuun voidaan määritellä SQRI-mallilla. Mallissa otetaan huomioon näytön MTF ja silmän kontrastin siirtofunktio. Mallin mukaan kuvan JND ero on pienimmillään keskisuurilla spatiaalitaajuuksilla (1...10 cycles/°), JND eron kasvaessa voimakkaasti spatiaalitaajuuksien kasvessa 10 cycles/° 40 cycles/° . /3/ Barten on Barker & Carpenterin tutkimuksen perusteella laske

nut SQRI arvot näyttökuvauksen laadulle spottikoon funktiona. Testi tehtiin projektionäytöllä heijastamalla kohteesta 10,1-kertainen suurennus keskimääräisen luminanssin ollessa 90 Cd/m² ja katseluetäisyyden ollessa 3 m. Laskennan mukaan spottikoon pieneminen 0,4 mm 0,2 mm parantaa näytöltä havaittavan kuvan subjektiivista laatua noin 3 JND yksikköä, mikä on merkittävä. /4/

9.1.3 Osoitettavuus

Osoitettavuus (Addressability) on se yksittäisten x-y pisteiden tai pikseleiden lukumäärä, joka voidaan osoittaa näyttöpinnalta /16/. Osoitettavan pikselin koko voidaan laskea jakamalla näytön dimensiot videomoodin tukemalla pikselimäärällä. Esim. näytön koko on 330 mm x 240 mm ja videoresoluutio 1600 x 1280 pikseliä. Tästä saadaan osoitettavan pikselin kooksi 0,21 mm x 0,20 mm. Normaali VGA-standardin näyttö tukee 640*480 pikselin esitystä, tämä on yhteensä 307200 pikseliä tai osoitetta. Korkearesoluutio 1600*1280 pikselin näyttö kykenee osoittamaan 2048000 pikseliä.

Mustavalko- ja värimonitorilta erotettavien pikselien määrä/osoittava pikselimäärä eroaa, vaikkakin molemmissa näyttötyypeissä olisi sama määrä osoitettavia pikseleitä. Syynä tähän on se, että pikselin pituus värinäytöllä tulee olla noin 1,7 kertaa fosforitripletin pituus. Tällöin vältetään värimoire' ja lankamaiset vääristymät. Erotettavien pikseleiden määrää rajoittaa lisäksi elektronisäteen kohdistusvirheet ja spotin vääristymät poikkeutuksen aikana. /5/ Osoitettavuuden kasvaessa kasvaa ohjauselektronikan hinta eksponentiaalisesti, mikä heijastuu korkearesoluutio näyttöjen kalliina hintana (> 10000 mk).

Bartenin tutkimuksessa /4/ tutkittiin HDTV osoitettavuuden kasvun vaikutusta havaittavaan kuvan visuaaliseen laatuun. Tutkimuksessa kokenut henkilö arvioi 80 cm leveää (16:9) näyttökuvasta 2,5 m päästä, näytön keskiluminanssin ollessa 100 Cd/m². Kokeen perusteella näyttölinjojen määrän ollessa yli 800 TV-linjaa kuvan subjektiivinen laatu saturoiduu. Toisaalta muutos 500 TV-linjasta 1000 TV-linjaan oli JND-arvoina noin 10, mikä vastaa huomattavaa subjektiivisen laadun parantumista.

9.1.4 Virkistystaajuus

Virkistystaajuus tarkoittaa sitä lukumäärä/sekunti (Hz), jona kuva CRT-näytöllä kirjoitetaan uudelleen tai virkistetään. Syynä virkistykseen on se, että elektronisäteestä fosfori himmenee elektronin pyyhkäisyn jälkeen. Jotta himmeneminen ei olisi silmin havaittavaa, tulee fosfori virkistää uudelleen. Virkistystaajuus vaikuttaa kolmeen kriittiseen CRT:n laatutekijään: välkyntään (flicker), kirkkauteen ja resoluutioon. Yleisesti voidaan todeta, että virkistystaajuuden ollessa alhaisempi kuin 60 Hz, on seurauksena havaittava välkyntä (oskiloiva luminanssi). Hewlett- Packard:n

järjestämissä tutkimuksissa 50 % koepopulaatiosta havaitsi välkynnän 60 Hz virkistystaajuudella, kun virkistys taajuus kasvatettiin 72 Hz:n vain 5 % koehenkilöistä havaitsi oskiloivan luminanssin /30/. Yli 70 Hz virkistys-taajuus vähentää täten näytön välkyntää. Välkyntä näkyy oskiloivana luminanssina ja tummina palkkeina pyyhkäisyjen välillä. Välkyntä rasittaa silmää, koska silmälihakset joutuvat tällöin jatkuvasti pitämään näyttökuvauksen fokuksessa. Havaittavaan välkyntään vaikuttaa näytön luminanssitaso, koko ja katselukulma. Näytön luminanssitason kasvaessa kasvaa kriittinen flicker-taajuus (CFF). CFF on se taajuus, jolloin flicker(välkyntä) tulee havaittavaksi. Kriittinen flicker taajuus voidaan laskea Ferry - Parker lakin avulla (kaava 37)/52/:

$$CFF = a \log L + b \quad (37),$$

jossa

a, b = vakioita, prEN29241-3 standardissa estimoituna a= 17,6 ja b=34,9

L = Luminanssi

Näytön luminanssin ollessa 60 Cd/m² on kriittinen flicker-taajuus ~ 66 Hz kaavan 36 mukaan laskettuna. Havaittava flicker kasvaa siis lineaarisesti suhteessa näytön luminanssilogaritmiin. Tästä on seurauksena se, että mitä kirkkaampi näyttö sitä suurempi flicker taipumus. /30/ Näytön korkearesoluutio menettää merkityksensä jos virkistystaajuus on alhainen, koska seurauksena on tällöin pisteenleviäminen (fosforien pitkä jälkiloisto aika).

Näytön skannusmoodilla (interlaced/non-interlaced) on vaikutus näyttöesityksen laatuun. Alhainen pikselin modulaarisuus eli se määrä millä pikselit peittävät toisiaan, joka on tyypillistä interlaced näytöille, johtaa näytön alhaiseen kontrastiin. Koska interlaced-näytössä vain joka toinen juova skannataan yhdellä näyttöpyyhkäisyllä, näytössä joudutaan käyttämään hitaita fosforeita oskilloivan luminanssin välttämiseksi. Non-interlaced näytöt korkealla virkistystaajuudella mahdollistavat nopeiden fosforien käytön, jolloin saavutetaan kirkkaampi ja terävämpi näyttökuvauks ja pikselin kokoa voidaan kontrolloida tarkemmin verrattuna interlaced näyttöön.

9.1.5 Näytön luminanssi ja kontrasti

Näytön luminanssi on kriittinen tekijä määriteltäessä näytön laatua. Luminanssin tasolla on vaikutuksena niin näytön värintoistoon, flickeriin, kuin MTF:ään. "Display luminance uniformity" on näytön kyky esittää luminanssi tasaisesti yli näytön. Näytön luminanssin epätasaisuus on näytön luminanssin tai värin tahaton variaatio yli näyttöpinnan. Luminanssin epätasaisuudet voidaan katekorioida kolmeen luokkaan:

-Laajat alueet:

Luminanssi- tai värigradientit näytön yhdeltä alueelta toiselle, kuten reunasta reunaan tai keskustasta-keskustaan gradientit. Tyypilinen usein CRT-näytöltä löydetävä laajan alueen vaihtelu on reunasta keskustaan vaihtelu. Tähän on eräänä syynä näyttöpinnan kaarevyys, jolloin säde osuu fosforiin vinossa kulmassa.

Pienet alueet:

Luminanssi- tai värimuutokset kuvaelementtien välillä. Tyypillisiä lähteitä ovat roskat, lika ja kuvaelementtien vauriot.

Reunojen epäjatkuvuudet:

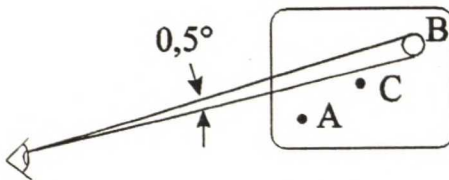
Jaksolliset luminanssi- tai värigradientit, seurauksena reunan tai epäjatkuvan kuvion muodostumisena.

ANSI:n (The American National Standard) standardi suosittelee, ettei luminanssivariaatioita saisi olla aktiivisen näyttöalueen reunalle 50 % suurempi kuin näytön keskellä. Tarkoituksettomat luminanssivariaatiot, puolen asteen sisällä, laskettuna katseluetäisyydeltä näytöstä pitäisi olla alle 50 %. Tyypillisesti useimmilla väri CRT-näytöillä luminanssi laskee reuna-alueille siirryttäessä vähemmän kuin 40 %. Luminanssin epätasaisuuden mittaukset tulee tehdä pimeässä huoneessa. Kaavoissa 38 ja 39 on esitetty luminanssin tasaisuuden laskentaa.

$$\frac{|(L_A) - (L_C)|}{L_C} \leq 0,5 \quad (38)$$

$$\frac{|L_{\max B}|}{L_C} \leq 0,5 \quad (39)$$

Kuvassa 29 on havainnollistettu luminanssin tasaisuuden laskennan parametrit.



Kuva 29. Luminanssin tasaisuus. C on luminanssi näytön keskustassa. A on luminanssi missä tahansa aktiivilla näyttöalueella. Ympyrä B voi olla myös missä tahansa aktiivilla näyttöalueella. 0,5 ° ympyrä projektoituna näytölle on halkaisijaltaan 0,0087 katseluetäisyyllä./1/

Näytön luminanssitaso vaikuttaa näytön värien kylläisyyteen. Mitä kirkkaampi kuva näytöllä sitä kylläsempiä värit ovat. Luminanssitason säätämällä korkealla on sekä hyötynsä, että haittansa. Korkea luminanssi parantaa näytön kontrastia, mutta samalla spottikoko ja spotin fokus voi muuttua.

Matala näytön luminanssi puolestaan heikentää silmän kykyä fokusoitua ja tunnistaa kuvaus näytöltä, samoin matala näytön luminanssi laskee luminanssi-kontrastia. Illumination Engineering Society (IES) ja standardin prEN29241-3 suositus näytön ja ympäristön luminanssisuhteeksi on 3:1. Työskentelytilassa korkeimman ja matalimman luminanssin suhde tulisi olla $< 10:1$. CRT-näytön kontrastilla on suuri vaikutus kuvapinnalta havaittavan informaation määrään. Näytön kontrasti voidaan määritellä esitettävän kohteen ja sen taustan välisenä luminanssisuhteena CR (Contrast ratio, kaava 40).

$$CR = \frac{L_H}{L_L} \quad (40),$$

jossa

L_H = korkea luminanssi,

L_L = matala luminanssi

Kontrastisuhteeseen vaikuttaa näyttöympäristön valaistus ja sen aiheuttama heijastus näyttöpinnalta. Näytöltä heijastuva luminanssi voidaan laskea kaavan 41 avulla /29/.

$$L_{ref} = ET_f^2 R_p \quad (41),$$

jossa

L_{ref} = näytön pintaheijastuksen luminanssi,

E = ympäristön illuminanssi,

T_f = näyttöpinnan transmittanssi ja

R_p = fosforipinnan heijastuskerroin

Näyttöpinnan transmittanssi vaihtelee välillä 0,60 ... 0,85. Fosforipinnan heijastuskerroin on riippuvainen näytön fosforityypistä ja "black matrix" käytöstä. Lisäksi näytön kontrastia voidaan parantaa seuraavilla rakenteellisilla keinoilla: absorboivan lasin käyttö, pigmentoitujen fosforien käyttö ja antiheijastuskalvojen käyttö. Tumman lasin käyttö vähentää CRT:n fosforien emittoima valo kertoimella T , mutta samalla ambientti valon heijastus vähenee kertoimella T^2 , joten kontrasti paranee kertoimella T . /57/

Lähteessä/4/ on määritelty luminanssitason vaikutus kuvan subjektiiviseen laatuun ilmaistuna SQRI-mallin avulla. Mallin tulosteen perusteella subjektiivinen kuvanlaatu kasvaa voimakkaammin matalilla luminanssi arvoilla ~ 10 JND ($5 \text{ Cd/m}^2 \dots 20 \text{ Cd/m}^2$),

kasvun hidastuessa välillä 20 Cd/m² ... 50 Cd/m², tällöin saavutettu JND:n kasvu on ~ 3 JND-yksikköä. On huomattavaa, että mitattu luminanssitasot ovat suhteellisen alhaisia. Subjekttiivisen kasvun hidastumisen yhtenä syynä on todennäköisesti spottikoon kasvu.

9.1.6 Geometrinen tarkkuus

Lineaarisuus, ortogonaalisuus, symbolien vääristymät ja geometrinen stabiilisuus (Jitter) ovat mittoja näytön geometriselle tarkkuudelle.

Lineaarisuus (Linearity) on mitta näytön kyvylle esittää tieto tasaisesti yli näyttöpinnan. Lineaarisuusvirheitä ilmenee aina näytöissä, johtuen magneetisesta säteen poikkeutuksesta ja CRT-geometriasta. Lineaarisuus testataan kuviolla, jotka muodostuvat tasaisin välein olevista pystysuorista ja vaakasuorista viivoista. Epälineaarisuus näkyy linjojen muodostaman hilan rakenteen laajentumisen tai kasaanpuristumisena. Kuvan rakenteen kasaantuessa näytöllä, se voi saavuttaa maksimin erotettavan taajuuden. Äärimmäiset epälineaarisuudet voivat kasvattaa kuvan spatiaalitaajuuden yli maksimierotustaajuuden aiheuttaen kuvan informaation vähenemistä./37/ Vaakasuoran tai pystysuoran viivan epälineaarisuus ei saisi olla 2 % suurempi suhteessa kolumnin tai pystysuoran viivan pituuteen /1, 21/.

Näytön muoto on näytön ulommaisten pikselin muodosta konttuuri. Se ilmaisee maksimi kuvauspinnan koon. Linjojen ja kolumnien tulisi olla saman suuntaisia ja ortogonaalisia toistensa suhteen lineaarisuusvaatimuksen mukaisissa rajoissa. Ortogonaalisuusehto ilmaistaan kaavalla 42. /1/

$$0,04 \times \left(\frac{\text{lyhin nurkka}}{\text{pisin nurkka}} \right) \geq \left| \frac{\text{lävistäjä}_1}{\text{lävistäjä}_2} - 1 \right| \quad (42)$$

Jos näyttökuva on neliö, lävistäjien pituudet eivät saisi erota 4 % enempää 2% lineaarisuus vaatimuksesta.

Jitter on mitta näytön geometriselle stabiilisuudelle. Kuvaelementin paikan geometrinen variaatio pitäisi olla yhtäsuuri tai vähemmän kuin 0,0002 mm/tarkasteluetäisyys (mm) yhden sekunnin aikana. Jitter:n määritelmä on ilmaistu kaavassa 43./1/

$$V_D \times 0,0002 \geq (H^2 + V^2)^{0,5} \quad (43)$$

jossa

V_D = tarkasteluetäisyys,

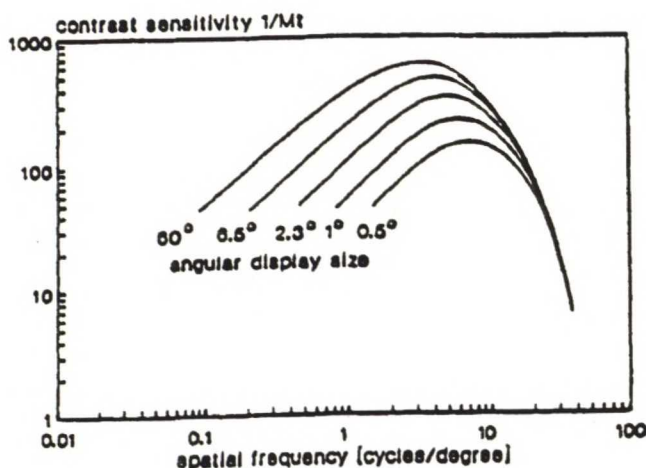
H = maksimi horisontaalinen poikkeama kuvaelementin keskustasta,

V = maksimi vertikaalinen poikkeama kuvaelementin keskustasta

Tyypilliseltä 500 mm katseluetaäisyydeltä huipusta huippuun Jitter ei saisi olla 0,1 mm suurempi. Jitterin havainnointi on kuvaelementin spatiaalipoikkeaman taajuuden ja amplitudin funktio. Taajuudet 1 .. 3 Hz ovat kriittisimmät. Yli 25 Hz:n Jitter taajuudet ovat kuvan epätarkkuutta.

9.1.7 Näytön koko

Vakiollisella katseluetaäisyydellä katselukulma kasvaa, kun näytön koko kasvaa. Tällä on positiivinen vaikutus havainnoituun kuvanlaatuun. Jos näytön piselimäärä pysyy vakiollisena näytön koon kasvaessa laskee kulmaresoluutio, jolloin kuvanlaatu heikkenee. Tämän takia annetulla näyttösystemillä ja annetulla näyttöetaäisyydellä on yleisesti optimi näyttökoko, jossa havaittu kuvanlaatu on maksimissa. Kuvassa 30 on havainnollistettu näytön koon vaikutusta kuvaan laatuun laskettuna SQRI- pisteinä./4/



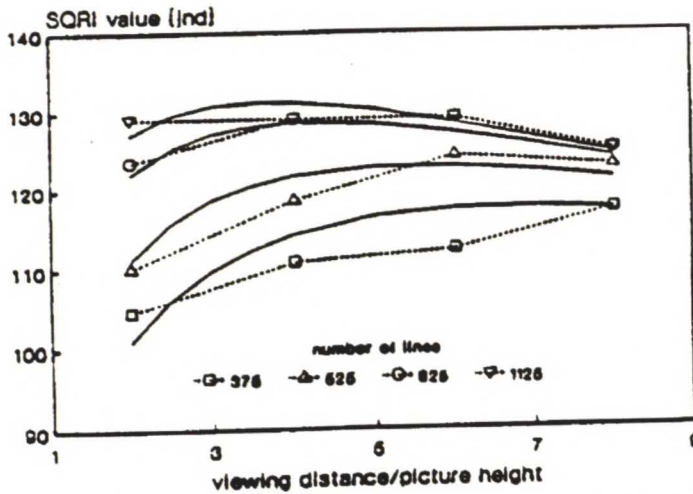
Kuva 30. SQRI arvo näytön NTSC televisionäytön leveyden funtiona. Näytön spottikoko 0,5 % kuvan leveydestä, katseluetaäisyys 2,5 m, näytön keskimääräinen luminanssi 100 Cd/m².

Viiteessä /33/ tehdyssä tutkimuksessa verrattiin näytön aspektisuhteen (16:9 ja 4:3) vaikutusta havaittavan kuvan laatuun. Tutkimuksessa aspektisuhteen 16:9 saama laatuarvo (8,5) oli merkittävästi suurempi kuin 4:3 aspektisuhteella (3,5) laatuskaalalla 0...10.

9.1.8 Katseluetaäisyys

Näytön tyypillinen katseluetaäisyys on 50 cm ... 80 cm. Katseluetaäisyyden kasvaessa katselukulma pienenee. Tällä on negatiivinen vaikutus havaittuun kuvan laatuun, mutta

samanaikaisesti kulmaresoluutio kasvaa. Täten annetulla näytöllä on optimi katseluetäisyys, joka riippuu näytön resoluutiosta ja muista näyttöparametreista. Katseluetäisyyden vaikutus SQRI-arvoihin on esitetty kuvassa 31.



Kuva 31. SQRI-arvot katseluetäisyyden funktiona eri TV-linjatiheyksillä.

Tässä tapauksessa TV-linjatiheyden ollessa 1125 saavutetaan optimikatseluetäisyys noin 3,5 metrissä, TV-linjatiheyden laskiessa kasvaa optimikatseluetäisyys. ISO 9241:3 mukainen näytön katseluetäisyys pitäisi olla 155 .. 175 kertaa käytettävä merkkikoko. Esim. jos fonttikoko on 12 pistettä ja 1 piste vastaa 0,376 mm (Eurooppalainen standardi) niin tällöin katseluetäisyys pitäisi olla tällöin noin 70 ... 80 cm. Näytön työskentelykulman tulisi olla välillä 0° .. 60°.

Tyypillinen spottikoko 19 " 1000 linjan TV-CRT:llä on 0,6 ja 485 linjan TV-CRT:llä 1,0 mm. Haluttaessa laskea maksimi spatiaalitaajuus, joka voidaan erotella näytöltä. Taajuus voidaan laskea, kun tunnetaan näytön MTF (kaava 19) ja silmän CSF(kaava 20), tällöin pätee $MTF(u) = CSF(u)$. Ratkaisemalla yhtälö saadaan spatiaalitaajuus u kaavalla 44:

$$u = \frac{-(\partial\pi L/180) \pm \sqrt{((\partial\pi L/180)^2 - 4(\pi^2 s^2/4 \ln 2))}}{\pi^2 s^2/4 \ln 2} \quad (44),$$

jossa

u = maksimaalinen näytöltä erottuva paikkataajuus,

L = katseluetäisyys,

s = CRT:n spottikoko

Taulukkoon 10 on laskettu näytön maksimaalinen spatiaalitaajuus katseluetäisyyden ja spottikoon funktiona.

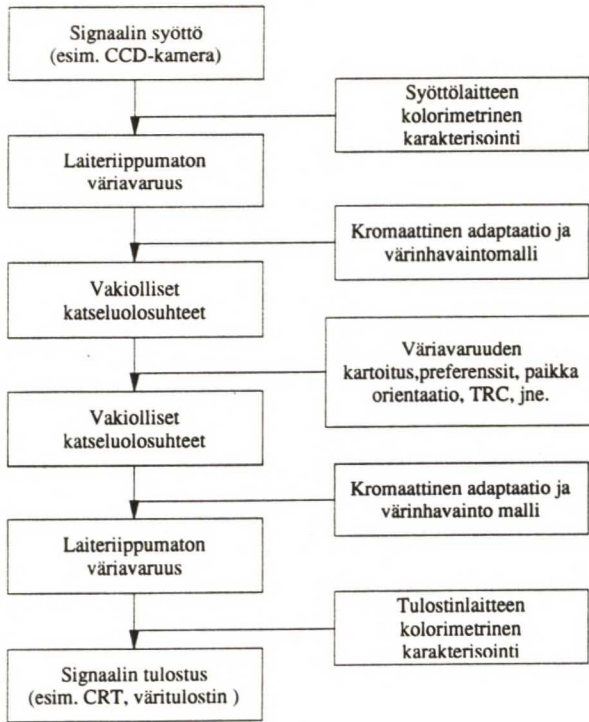
Taulukko 10. Katseluetäisyyden vaikutus näytön maksimaaliseen spatiaalitaajuuteen (u)

Katseluetäisyys (L[cm])	Spottikoko (s[mm])	Spatiaalitaajuus (u[linjaa/cm])
50	0,6	18,65
	1,0	12,29
200	0,6	10,09
	1,0	8,21
500	0,6	4,74
	1,0	4,45

Taulukon 10 perusteella voidaan todeta, että katseluetäisyyden kasvaessa näytöltä erotettava maksimaalinen paikkataajuus laskee.

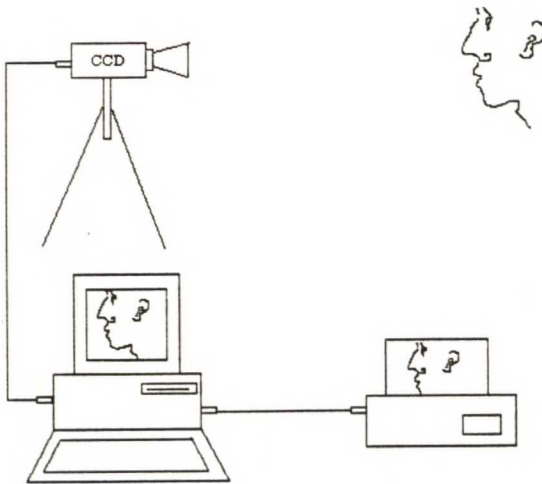
9.2 Näytön kalibrointi

Näytön kalibrointi on edellytys paperin, painatuksen, tulostuksen yms. realistiselle visualisoinnille näyttöympäristössä. Väri CRT-näytön input-ouput-suhde on usein epälineaarinen ja RGB-primäärien kromaattisuus on riippuvainen käytettävästä laitteesta. Jotta haluttu väri voidaan toistaa oikeana, tulee selvittää monitorin RGB värillisyyden ja CIE XYZ väriavaruuden suhde. Määrittelemällä RGB-XYZ-yhteys voidaan edelleen määritellä XYZ-CIELab-yhteys, joka on ehkä tämän hetken tunnetuista värijärjestelmistä yhtenäisin ja siis paras laskentajärjestelmä värimonitorin ja esim. painatuksen yhteyden selvittämiseksi. Näytön värireproduktio voidaan jakaa kahteen osaan: värikoordinaattien muunnokseen (color coordinate transformation) ja gammakorjaukseen. Kaaviossa 1 on esitetty WYSIWYG (What You See Is What You Get)- vuokaavio signaalin syöttön ja tulostuksen eriprosessivaiheiden vaikutuksesta havaittuun/mitattuun värillisyyteen /6,7 /



Kaavio 1. WYSIWYG-vuokaavio./6/

Näytön kalibrointi merkitsee siis syöttö-tulostustietojen kalibrointia eli CRT:n digitaalisen input-signaalin (digital to analog converter value, DAC-arvon) ja näytön luminanssi-output-suhteen kalibroimisesta jokaiselle R,G,B tykille./26/ Kuvassa 32 on yksinkertainen havainnollistus prosessin kalibroinnista.



Kuva 32. Näytön ja tulostuksen WYSIWYG:n periaatekuvaus l. näyttö- ja tulostuskuvauksen kuvainformaatio(väriillisyy, orientaatio) vastaa orginaalinkuvainformaatiota.

9.2.1 Värikoordinaattien transformaatio ja värilämpötilan säätö

Värimonitori toimii illuminanttina l. on itsesäteilevä. Tällöin näytön värillisyytilaksi voidaan säätää tietty standardi valonlähteen värillisuus. Näytön värillisyytilan yleinen mittasuure on näytön valkoisuus (white point), valkoisen näytön tristimulus arvot, kun kolmen fosforin luminanssi -output on maksimissa.

Värireferenssin valinnasta on olemassa erilaisia käytäntöjä. Värilämpötila 9300 K (sinertävä valkoinen) on Japanin TV:n ja tietokonegrafiikan yleinen värireferenssi. Graafisessa teollisuudessa käytössä olevat referenssit ovat D65 (6500 K) ja D50 (5000K). Näistä D50 vastaa parhaiten pohjoisen taivaan päivänvalo-ominaisuuksia. D50 on Suomessa standardin SFS 4912 mukainen valonlähde kuultokuvien ja heijastuskuvien tarkastelussa, kun standardin D65 on värillisyyssmittauksissa yleisesti käytetty standardi sekä SMPTE suosittelema näytön valkoisuustila. Toisaalta näyttöjä valmistava teollisuus on siirtymässä 6500K korkeampiin värilämpötiloihin 7500-8200 K. Kolometrisen vertailun standardoiminen näyttö- ja luonnollisen ympäristön välillä on ristiriitaista. Esimerkiksi ANSI PH 2.30-1989 ja SFS 4912 standardit suosittelevat transmissiokuvien tarkasteluun valonlähdetä D50 1400 Cd/m² luminanssitasolla (päivän valo), kun monitorit, jotka on kalibroitu 6500 °K omaavat tyypillisesti 61 Cd/m² luminanssitason (hämäränäkö)./8,24/ Taulukossa 11 on standardivalonlähteitten D50, D55, D65, D75 ja 9300 K° CIE 1931xy kromaattisuuskoordinaatit ja ekvivalentit värilämpötilat.

Taulukko 11. Standardi illuminanssien kromaattisuus ja värilämpötila.

white point	x	y	T _C
D50	0,3457	0,3587	5000
D55	0,3324	0,3475	5503
D65	0,3127	0,3290	6504
D75	0,2990	0,3150	7504
9300 K°	0,272	0,303	9300

3359

Seuravassa on tarkasteltu näytön RGB-värillisyysskoordinaattien transformaatiota XYZ-tristimulusarvoiksi. Näytön fosforien illuminanttiominaisuutta kuvataan tavallisesti RGB fosforien CIE1931 kromaattisuuskoordinaatteina (x,y) ja luminanssina Y:

R: (x_R, y_R), Y_R,
 G: (x_G, y_G), Y_G ja
 B: (x_B, y_B), Y_B

Fosforien xy kromaattisuuden ja tristimulusarvojen X,Y,Z välillä on kaavan 15 (sivu 22) mukainen relaatio, jossa luminanssi Y vastaa tristimulusarvoa Y. Näytön fosforien

RGB-arvojen ja tristimulusarvojen välinen muunnos voidaan määritellä kaavan 45 pohjalta.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (45),$$

jossa

T = 3x3 muunnosmatriisi

Ratkaisemalla yhtälö transformaatiomatriisille T saadaan arvot (kaava 46):

$$T = \begin{bmatrix} \frac{255}{L_{R_{\max}}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{255}{L_{G_{\max}}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{255}{L_{B_{\max}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{xR}{yR} & \frac{xG}{yG} & \frac{xB}{yB} \\ \frac{1}{1-xR-yR} & \frac{1}{1-xG-yG} & \frac{1}{1-xB-yB} \\ \frac{1}{yR} & \frac{1}{yG} & \frac{1}{yB} \end{bmatrix}^{-1} \quad (46)$$

jossa

$L_{R_{\max}}$ = R-primäärin maksimiluminanssi,
 $L_{G_{\max}}$ = G-primäärin maksimiluminanssi ja
 $L_{B_{\max}}$ = B-primäärin maksimiluminanssi

Täten transformaatiomatriisi on määritelty perustuen näytön illuminanttiluonteeseen./56/

9.2.2 Gammakorjaus

Näytön luminanssin ja RGB arvojen välinen suhde ei ole lineaarinen. Tämän suhteen linearisointia kutsutaan yleisesti gammakorjaukseksi. Gamma on valokuvausalan termi, joka tarkoittaa input ja output vaaleuden suhdetta. Gamma vastaa prosessin sävyntoistonkäyrän kulmakerrointa logaritmisella asteikolla eli jos prosessin sävyntoisto on lineaarinen on prosessin gamma(γ) 1,0. Jotta näyttökuvaukseen voidaan tehdä luotettavia muutoksia tulee prosessin olla lineaarinen. Gamman ilmaiseminen logaritmisena suurena tarkoittaa sitä, että prosessi on epälineaarinen kaikilla muilla arvoilla kuin 1./11/ CRT:n emittoima luminanssi L on epälineaarinen funktio sisääntulevan videosignaalin ohjausjännitteen suhteen (gammafunktio). Epälineaarisuutta aproksimoidaan yleensä potenssilausekkeella (kaava 47):

$$L(v) = (kv)^\gamma \quad (47)$$

jossa

k ja γ ovat vakiota

Eksponenttin arvo γ (gamma arvo) vaihtelee useimmilla näytöillä 2,2 .. 2,5, joista 2,2 on standardi NTSC systeemissä./37/

Esimerkiksi jos prosessia kuvataan kolmella vaiheella, joilla jokaisella on oma gammansa ($\gamma_1 \diamond 1$ ja $\gamma_2 \diamond 1$ ja $\gamma_3 \diamond 1$). Jotta prosessi voidaan pitää lineaarisena, eri vaiheitten gammat tulee voida kertoa keskenään ja tuloksen tulee olla 1. MonCal 3.0 näytön kalibrointiohjemassa näytön tilaa kuvataan seuraavilla kolmen eri gamma-arvon avulla /11/:

- operointigamma (Operating gamma),

joka on fyysinen gamma-arvo, silloin kun systeemin korjausta tai kalibrointia ei ole suoritettu. Tyypillinen operointigamma vaihtelee välillä 1,5 .. 2,6. Esimerkiksi videokameralla digitoitujen kuvien esittämiseen sopiva gamma-arvo on 2,2.

- korjausgamma (Correction gamma)

on operointi gamman käänteisarvo.

- työskentely gamma (Working gamma)

Työskentelygamma on operointigamman ja korjausgamman tulo. Näytön kalibroinnin tavoitteena on säätää työskentelygamma lineaariseksi eli
työskentelygamma = operointigamma x korjausgamma = 1

Gammakorjauksessa tapahtuu aina kvantisointivirhettä, mikä näkyy erityisesti RGB-arvojen matalassa päässä < 14 yksikköä (jos systeemi on kvantisoitu 256 tasoon/osaväri)./56/ Tämän voidaan kompensoida rakentamalla tummille sävyille oma LookUp-taulukko.

10 PAINOJÄLJEN NÄYTTÖESITYS

Jotta painojäljen näyttökuvaus jäljittelisi painojälkeä tulee näyttökuvauksen ottaa huomioon painatuksen sävyntoistolle, värillisyydelle ja densiteetille asettamat vaatimukset/rajoitteet. Useimmat painomenelmät eivät kykene toistamaan kuin kaksi sävyä. Vaihtoehtoina ovat siis painettu tai painamaton pinta. Sävyt saadaan aikaan jakamalla painettava pinta pieniin pisteisiin l. rasteripisteisiin. Visualisoidessa näytöllä painojäl

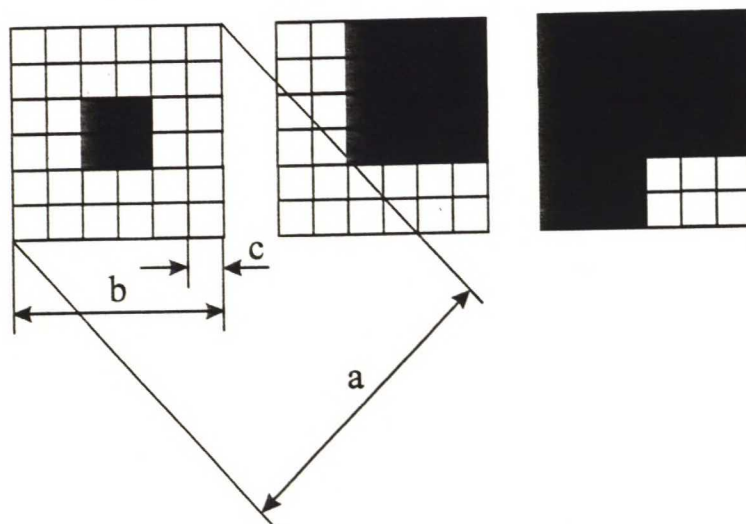
keä on järkevää pyrkiä ideaalirasterirakenteen luomiseen l. luodaan rasterirakenne, joka muodoltaan vastaa mahdollisimman tarkasti optisessa rasteroinnissa muodostuvaa säännömukaista pistettä (esim. timantti). Tähän on syynä se, että pisteen leviämisen mallittaminen helpottuu rasterimuodon olessa mahdollisimman säännönmukainen.

Digitaalinen rasterointi mahdollistaa optiseen rasterointiin verattuna laajan joukon erilaisia rasterirakenteita. Toisaalta pikselirakenteesta johtuen, sävyn toisto on digitaalisessa rasteroinnissa aina portaallinen. Rasterointi voidaan jakaa kahteen luokkaan jaksollisiin (rationaalsiin) ja jaksottomiin (irrationaalsiin) rasteroitimenetelmiin. Jaksollisen rasteroinnin päämuuttujat ovat:

- Rasteripistekoko.
- Rasteritiheys,
- Rasterikulma ja
- Rasterirakenne

10.1 Jaksollinen rasterointi

Rasteroinnin päätarkoitus on muuttaa orginaalikuva paikalliset densiteettivaihtelut rasteripistekoon muutoksiksi. Orginaalin vaaleita sävyjä vastaa yleensä 3...10 % piste, kun tummiasävyjä vastaa pistekoko 85...95%./59/ (kuva 33)



Kuva 33. Digitaalinen 6x6 matriisirasteri. Eri sävyt muodostetaan varioimalla suhteellista peittoa. Kuvassa $1/c$ = jaksotaajuus, $1/a$ = rasteritiheys ja $1/c$ = pikselitaajuus.

Digitaalisessa deterministisessä rasteroinnissa rasterijakson muodostaa pikselimatriisi, joka simuloi konventionaalista rasterirakennetta. Digitaalisen rasterimatriisin koko määrää toistettavien sävyjen määrän (kaava 48):

$$m = K \times L + 1 \quad (48),$$

jossa

m = sävyjen määrä,

K,L = rasterimatriisin koko

Digitaalisessa rasteroinnissa sävyjen määrää rajoittaa siis rasterimatriisin koko.

Rasterirakenteen valinnalla voidaan vaikuttaa rasterirakenteen näkymiseen. Näköjärjestelmä toimii alipäästösuotimen tavoin. Jotta digitaalisen kuvan pikselirakenne, rasterirakenne ja portaallinen tummuuden toisto eivät näkyisi, tulee taajuuden olla riittävä. Jaksoillisilla rastereilla (esim. timantti ja linjarasteri) keskisävyt ovat rakenteen näkymisen kannalta kriittisiä verattuna jaksottomiin rasterointitapoihin (esim. Bryngdahl ja Bayer-rasterointi). Rakenteen näkyvyyttä voidaan vähentää kahdella tavalla pienentämällä pikselikokoa tai/ja rasterirakenne suunnittelulla. /34/

Rasteritiheys ilmaisee rasteripisteiden paikkataajuuden (kuva 29, [l/" tai l/cm]). Simuloitaessa painatusta näytöllä suurimman rajoitteen simulaatiolle asettaa näytön resoluutio. Taulukossa 12 on eri painatusmenetelmissä käytettäviä linjatiheyksiä (1/a) ja rasterimatriisin hilaleveys (b), olettaessa rasterimatriisin muodostuvan säännönmukaisesta hilasta.

Taulukko 12 . Rasterointitiheyden asettama vaatimus rasterimatriisin hilan koolle 1:1 visualisoinnissa. $b = a/\sqrt{2}$

Painomenetelmä	Rasteritiheys[l/cm]	b[μm]
NIP	20	354
Sanomalehti	30	236
Offset, MF-paperi	40	177
Offset, päällystetty paperi	60	118
Syväpainatus	70	101

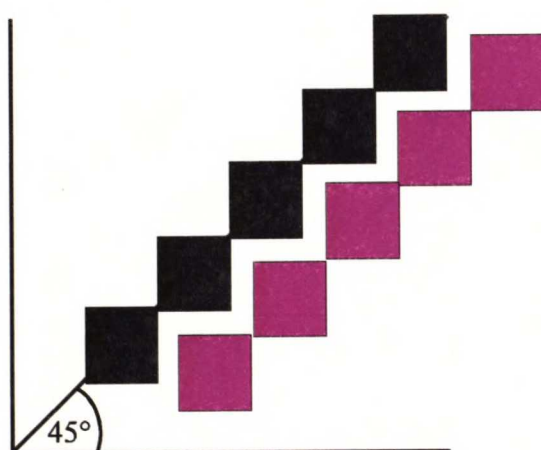
Taulukosta nähdään, että jos halutaan visualisoida painojälkeä 1:1 näytöllä, jonka pikselikoko on esim. 0,26 mm = 260 μm, niin se on käytännössä mahdotonta normaalilla katseluetäisyydellä. Ratkaisuna ongelmaan on siirtää havainnoija määrätyn etäisyyden päähän näytöstä ja taten kasvattaa näytön resoluutiota. Esim. tarkastelu 3 m:stä pienentää havaittavan pikselin kymmenenteen osaan 0,026 mm = 26 μm. Tällöin eri painotelmien rasterimatriisit voidaan rakentaa seuraavilla matriiseilla (taulukko 13).

Taulukko 13. Näytön resoluution asettamat rasteritiheydet

Painomentelmä	Matriisikoko pikseleinä , (c=1 pikseli=26µm)	Saavutettava rasteritiheys[l/cm]	Sävymäärä (max.)
NIP	13x13	21	170
Sanomalehti	9x9	30	82
Offset, MF-paperi	6x6	45	37
Offset, päällystetty paperi	4x4	68	17
Syväpainatus	3x3	90	10

10.2 Värirasterointi näytöllä

Resoluutorajoitteisella näytöllä on ideaalisten jaksollisten osavärirasterien luonti erittäin vaikeaa ilman että rasterirakenne "hajoaa". Syynä tähän on se, että pikselit eivät rotatoi. Esim. Adoben suositus 40 l/cm rasteritiheyden PostScript-rasterikulmiksi (irrationaalisia) ovat: C(71,57°), M(18,43°), Y(0°) ja K(45°). Näistä kulmista vain kel-
taisen ja mustan osavärirasterit olisi toteutettavissa ilman suuria ongelmia rasteriraken-
teen hajoamisessa. Konventionaalisista rasterointikulmista yleisempiä ovat: K(45°),
C(75°), M(45°) ja Y(0°). Näytöresoluution rajoissa voidaan rakentaa ideaalisia rasteri-
pisteitä vain 45° kulmavälein. Ratkaisua ongelmaan voidaan hakea Flamenco-rasteroi-
nista. Flamenco--rasterointi eroaa perinteisestä rasteroinnista siinä, että kaikilla osavä-
reillä on sama rasterikulma (esim. 45°, kuva 35).

**Kuva 35.** Osavärirastereiden sijoittuminen Flamenco-rasteroinnissa.

Neliväri sävyvaikutelma luodaan rasterien paikkasiirtymällä. Teoreettisesti samaa käyt-
tämällä kulmaa voidaan eliminoida moiré-ongelma. Menetelmän etuina ovat hyvä sä-
vyntoisto, laajempi dynaaminen alue, väriavaruus ja kuvan terävyyden paraneminen.
Laskennallisesti flamenco-rasteri on nopea: jokaisella osavärillä on vakiollinen sama

kulma. Painatuksen kannalta Flamencon on parhaimmillaan matalilla rasteritiheyksillä noin 20 l/cm ... 54 l/cm. Painatuksellisesti flamenco-rasterointi asettaa korkean vaatimuksen painatuksen kohdistukselle verrattuna traditionaalisiin painomenetelmiin./14/

10.3 Painojäljen ja CRT-esityksen vertailu

Paperi on yleinen informaation kantoalusta. Painatuksessa paperin pintarakenteella on suuri merkitys, painoväriin lisäksi syntyneen painotuotteen laatuun ja painojäljen visuaalihavainnon muodostumiseen. Paperista saatavaa subjektiivista vaikutelmaa nimitetään paperin pohjaksi. Tärkeä paperin pintarakenteeseen vaikuttava tekijä on paperin formaatio. Formaatio on se tapa, jolla paperin muodostavat kuidut ovat jakautuneet, asettuneet ja sekoittuneet keskenään /46/. Formaation tasaisuus vaikuttaa paperin painettavuuden kannalta tärkeisiin ominaisuuksiin, kuten huokosrakenteeseen ja paksuuden tasaisuuteen. Huokoisuus vaikuttaa painoväriin tunkeutumiseen painopaperiin. Siileysvaihtelu (taajuus, suuruus) heijastuvat painojäljen tasaisuudessa. Tämä näkyy esim. pisteenleviämisenä, kiiltovaihteluina, väripinnan epätasaisuutena.

Painojäljen leviäminen paperilla tapahtuu kahdella mekniismilla: fysikaalisesti ja optisesti. Fysikaalisessa pisteenleviämisessä väri leviää siirtyessään painopinnalta paperille, kun optinen pisteen leviäminen on valon diffuusiota painoväripinnassa. Seurauksen rasterirakenteen jyrkät reunat pehmenevät ja kontrasti laskee. Painatuksen laatua voidaan karakterisoida MTF:n avulla. Painatuksen MTF riippuu pääasiallisesti käytettävän paperin laadusta. Päällistetyllä (esim. LWC) paperilla voidaan painaa paljon pienempiä yksityiskohtia kuin päällistämättömällä paperilla (sanomalehti). Pisteenleviäminen kasvattaa tummassa päässä saavutettavaa densiteettiä samalla vähentäen tummanpään kykyä toistaa yksityiskohtia. Toisaalta vaaleiden sävyalueiden kontrasti kasvaa. Sävy muutokset ovat herkempiä tiheärakenteisissa rasterirakenteissa kuin karkearakenteisilla rasterilla. Painatuksen dynaaminen alue riippuu pääasiallisesti paperin ja painoväriin heijastusominaisuuksista. /34/ Painojäljen epätasaisuuden lähteet voidaan jakaa seuraavasti/49/:

- paperin optinen epätasaisuus (heijastusvaihtelu, kiiltovaihtelu, valon tunkeuman vaihtelu, opasiteetin vaihtelu) ,
- painoväriin optinen epätasaisuus (valon absorption ja hajaheijatuksen vaihtelu),
- paperin ja painoväriin vuorovaikutuksista aiheutuvat epätasaisuustekijät (painovärimäärän vaihtelu, valon tunkeuman vaihtelu)

Pisteenleviämisen eksakti mallittaminen näytöllä edellyttää näiden vuorovaikutussuhteiden tuntemista. Pisteenleviäminen painojäljen näyttövisualisoinnissa voidaan tehdä joko generoimalla rasterirakenteen kohinaa filterien avulla tai/ja ohjelmallisesti. Oh-

jelmallinen paperin/painojäljen generointi ja visualisointi mahdollistaa eri vuorovaikutussuhteiden huomioonoton. Tässä työssä pisteenleviämisen tarkastelu rajoittuu kahden kaupallisen kuvankäsittelyohjelman tarjoamiin mahdollisuuksiin. Digitoidun paperin ja rasterirakenteen vuorovaikutusta on tarkasteltu tarkemmin kokeellisen osan kappaleessa 13.6.

Jotta näytöllä voidaan simuloida esim. painojälkeä vaaditaan näytöltä painatusta laajempi väriavaruus. Värimonitorin käyttöä rajoittaa yleensä varsinkin laatupainatuksen vedostimena/visualisoijana sen pieni kontrasti- 1 dynaaminen alue verattuna painatukseen. Parhaimmillaan monitorin dynaaminen alue on noin 1,0 D yksikköä, kun laatupainatuksessa voidaan päästään lähes kaksinkertaiseen densiteettialueeseen. Toisaalta värimonitorien kylläisyysalue on suurempi kuin painojäljessä. /24, 26/

Näyttövisualisoinnin ja painatuksen eräänä erottavana tekijänä on näytön illuminanssiluonne. Näytön kirkkaus riippuu näytön generoimasta valosta, kun paperin vaaleus riippuu paperin heijastamasta ympäristön valosta. Valkoisen paperin luminanssi normaallissa toimistovalaisuudessa on 200-250 Cd/m², kun näytön maksimiluminanssi harvoin on 120 Cd/m² suurempi. On huomattava, että painojäljen minimiluminanssi standardiolosuhteissa on alimmillaan 5 Cd/m², kun värimonitoreilla minimiluminanssi on yleisesti tätä arvoa selvästi alhaisempi < 1 Cd/m².

Paperille tyypillisiä ominaisuuksia ovat: tasalaatuisuus verrattuna näyttöön, korkea kontrasti (painettuna mustalla painovärillä), korkea resoluutio ja se, että paperi ei luonnostaan välky kuten näyttö. Suurimpana erona paperin ja CRT-näytön välillä on ehkä se, että näyttö täytyy virkistää, mistä on seurauksena oskiloiva luminanssi, jos virkistystaajuus on alhainen. Taulukossa 14 on vertailtu CRT-monitorien ja toimistopaperin laatuominaisuuksi.

Taulukko14. CRT-monitorien ja toimistopaperin laatuominaisuuksien vertailu.

Laatutekijä	2000- linjan monitori	1600- linjan monitori	HDTV monitori	VGA monitori	konvent. High-end TV	Paperi*
Pikseleitä(V)	2048	1600	1920	640	440	2100
Linjoja(H)	2048	1280	1035	480	485	2900
Katseluetaisyys	50-80 cm	50-80cm	1,5-4,5m	50-80cm	1,5-4,5m	15-50cm
Säteen poikkeutus (°)	90	90	110	90	110	-
Koko (")** (tyypillinen)	20 x 20	17 d	34 d	13 d	27 d	14 d
Pitch (mm)	0,31	0,26	0,48	0,26	0,80	0,085*
Spottikoko (mm) (näytön keskellä)	0,60	0,60	1,41	0,65	2,00	-
Merkkikoko (mm)	< 2,54	< 2,54	> 12,7	3,18	12,7	1,3
Luminanssi (Cd/m ²)***	78	100	544	60	544	200
Luminanssisuhde	1/3	1/2.4	1/0,46	1:4	1/0,46	1/1,25

Virkistystaajuus (Hz)	60-72 ni	60-72 ni	30/60 i	60-72 ni	30/60 i	-
Geometriset vääristymät (%)	<1,0	<1,0	>5,0	<1,5	>5,0	-
Maksimi merkkimäärä	33000	13000	2500	2400	1200	26896

* tyypillinen toimistodokumentti (A4 paperi, 300 dpi:n tulostusresoluutio
fonttikoko 4 pistettä)

** d=lävistäjä

*** aproksimoitu candelaar/neliometri

**** näyttöluminanssin suhde ympäristön luminanssiin. Oletuksena on toimistoympäritölle tyypillinen
250 Cd/m²

11 JOHTOPÄÄTÖKSIÄ TEORIAN PERUSTEELLA

Visuaalihavainto näyttöympäristössä muodostuu näytön, työskentely-ympäristön ja havainnoitsijan vuorovaikutuksesta, jossa havainnoitsijan aikaisemmat kokemukset, visuaaliset taidot ja ominaisuudet vaikuttavat yhdessä laiteympäristön rajoitusten ja mahdollisuuksien kanssa visualisoinnin laatuun ja luotettavuuteen.

Havainnoitsijan ominaisuudet tulee ottaa huomioon suunniteltaessa havaintoympäristöä, kuten koehenkilön näönlaatu ja adaptaation aste koetilanteessa. Illuminantin valonvoimakkuus ja spektraalinen sisältö heijastuvat näytöltä havaittavien yksityiskohtien tarkkuudessa ja värillisyydessä. Kohteen havainnointi ympäristöstään riippuu pääasiassa kontrastista. Luminanssitason nostolla voidaan parantaa kontrastiherkkyyttä, resoluutiota sekä siirtää maksimiherkkyyttä korkeammalle. Valonlähteen kromaattisuus tulee tuntea ja sen on oltava vakiollinen.

Visuaalihavainnon laatua, luotettavuutta voidaan testata parivertailumenetelmillä. Menetelmien menestyksellä soveltaminen edellyttää koetilannemuuttujien (valonlähdes, katseluetaisyys, kysymyksenasettelu, havaintoaika, kohteen koko ja muoto) hallintaa ja vakiollisuutta.

12 KOKEELLINEN OSA

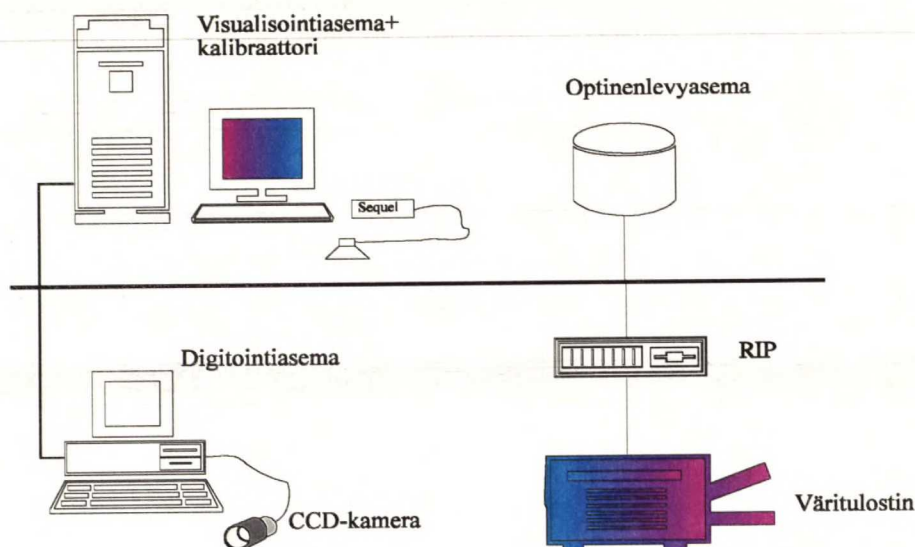
12.1 Toteutusympäristö

Toteutusympäristönä diplomityössä on TKK:n graafisen tekniikan laboratorioon rakennettu koejärjestely: PC, CRT-täysvärinäyttö, kalibrointilaitteisto ja digitointiin käytetty B/W CCD-kamera ja PIP:n framegrabber (taulukko 15).

Taulukko 15. Diplomityössä käytety laitteistokokoonpano.

VISUALISOINTIASEMA				
PC	prosessori	Muisti	Kiintolevy	väylä
(Leo)	50 MHz 486	8 MB RAM	240 MB	EISA
NÄYTÖNOHJAIN	väriesitys	Muisti		väylä
(Matrox Impression Ultra)	24bittiä/pikseli	8 MB VRAM + 1MB RAM		EISA
CRT	koko	resoluutio	pikselikoko	
(EISO T560i-T TCO)	17"	1600*1280	0,26 mm	
KALIBROINTILAITTEISTO				
Sequel Imaging näytönkalibrointi (GIZ-CL-MRT) - ja ohjelmistopaketti (MonCal 3.0)				
CCD-KAMERA +	standardi	herkkyys	resoluutio	
(COHU 4710)	RS-170	1,5 lux	512*512	
+FRAMEGRABBER				
(PIP 1024B)				

Visualisointiaseman rungon muodostaa nopealla sisäisellä EISA-väylällä varustettu 486-PC. Näytönohjaimena on MATROX:n täyspitkäadapteri, jonka maksimaalinen videoresoluutio on 1600x1280 pikseliä 24 bittiä/pikseli väriesityksellä. Tällöin systeemi kykenee teoreettisesti esittämään 16,8 miljoonaa värisävyä. Visualisointiaseman oman 240 MB:n kiintolevyn lisäksi, asema on NOVEL-verkon välityksellä liitännässä optiseen 500 MB:n levyasemaa (systeemin teoreettinen tallennuskapasiteetti 740 MB). Verkkoliitäntä mahdollistaa myös vedostuksen FIERY 125 i RIP välityksellä CANON 500 CLC väritulostimella(kuva 36).



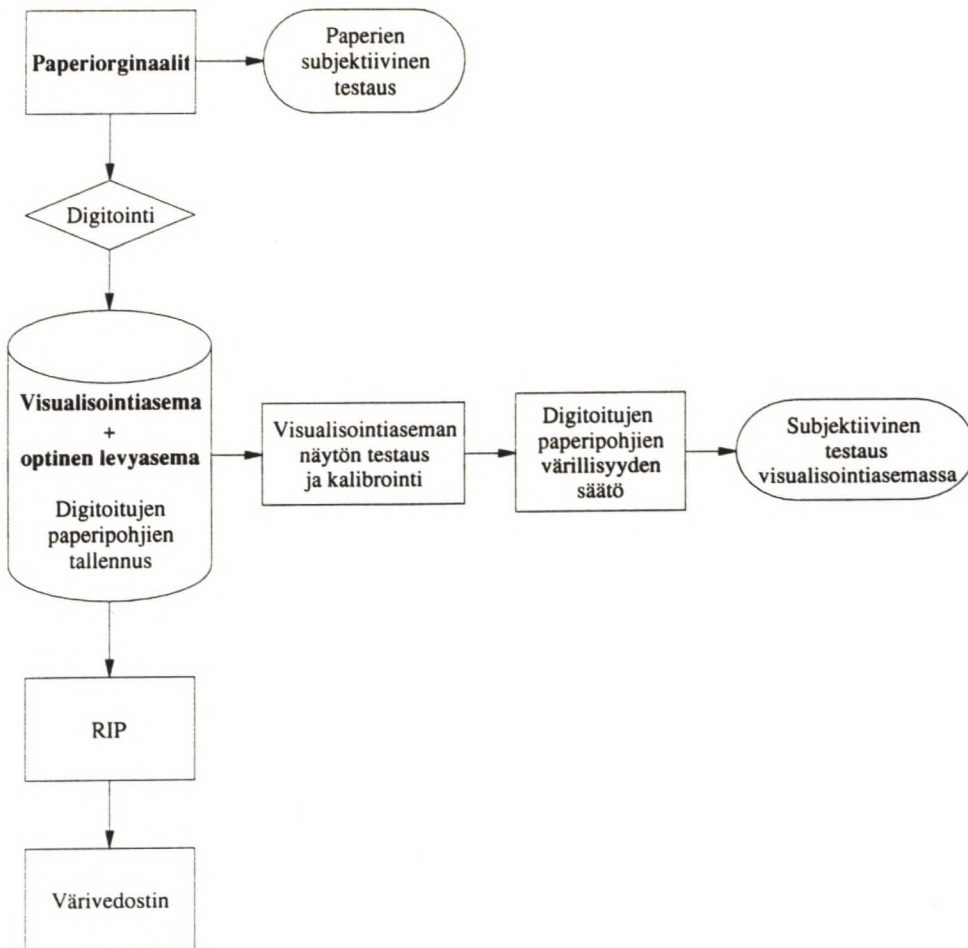
Kuva 36. Diplomityön laitteistokokoonpano.

12.2 Tutkimussuunnitelma

Diplomityön tutkimusvaiheet voidaan jaotella seuraavasti:

1. CRT:n laadunmittaus
2. CRT-näytön kalibrointi
3. Paperipohjien laatuominaisuuksien mittaaminen ja digitointi, digitoitujen paperien värillisyyden säätö
4. Paperiorginaalien parivertailu ja MDS-analyysi
5. Digitoitujen paperipohjien parivertailu ja MDS-analyysi
6. Ideaalirastereiden luonti
7. Rasterirakenteen ja paperin yhteisvaikutuksen visualisointi

Suorittamalla parivertailut sekä paperiorginaalien kesken, että digitoitujen paperipohjien välillä pystytään osoittamaan visualisoinnin hyvyys 1. asettuvatko paperit/digitoidut paperipohjat mitattujen ominaisuuksien mukaiseen järjestykseen molemmissa vertailutilanteissa. Diplomityön koejärjestelykuvaus on esitetty kaaviossa 2.



Kaavio 2. Diplomityön koejärjestelykuvaus.

Diplomityön kokeellisen osion osavaiheiden kuvaus on esitetty tarkemmin seuraavissa osavaiheisiin liittyvissä luvuissa.

13 TULOKSET

13.1 Näytön laadunmittaus

Diplomityössä visualisointi tapahtui EIZO:n Flexscan T560i-TCO korkearesoluutio RGB-näytöllä. Seuraavassa on listattuna näytön yleisiä ominaisuuksia:

- 17" TRINITRON-näyttö, 90 asteen deflaatiokulma,
- maksimi näyttöresoluutio 1600 * 1280 pikseliä
- RGB pisteiden keskipisteiden etäisyys = 0,26 mm
- kaksi näyttöasetuksen muistitilaa
- näyttövärillisyden säätö (R,G,B)
- sinisen ja punaisen osavärin GAIN-säätö, vihreän säätö automaattinen
- "white balancen" säätö

- saturoinnin, näyttökoon, ja näyttögeometrian säätö
- tehdasesiasetusten valinta
- vaakasuora pyyhkäisytaajuus 30 kHz - 80 kHz (automaattinen)
- pystysuora pyyhkäisytaajuus 55 kHz - 90 kHz (automaattinen)
- D.B.S.C (Dynamic Beam Spot Control)

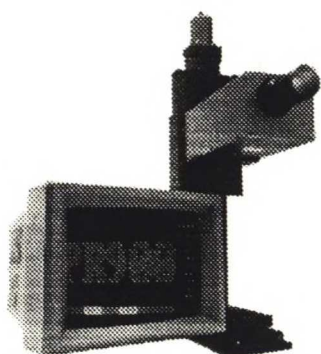
Visualisointiaseman laatu analysointiin näytön värillisyyden, luminanssin ja geometrisen tarkkuuden mittauksin. Näytöstä mitattiin seuraavat laatusuureet:

- 1) maksimi luminanssi (DOS-tilassa ja WINDOWS-tilassa tehdasesiasetuksessa),
- 2) CIE xyY 1931 ja CIE L*a*b* värijärjestelmien mukainen väriavaruus,
- 3) Jitter (spatiaalinen epätasaisuus)
- 4) geometriset vääristymät (ISO:n, Sae:n ja Eia:n standardien mukaan),
- 5) palkkikuvion(vihermusta) luminanssiprofiili.
- 6) värillisyyden ja luminanssin isotrooppisuus,
- 7) luminanssin ryömiminen ja
- 8) RGB-fosforien värillisuus CIE xyY 1931 väriavaruudessa.

Näytön laatusuureiden määrittämiseen käytettiin kolmea mittauslaitteistoa; Photo Research PR-900 videofotometriä, Photo Research PR-703 A/PC spektrometriä ja Minolta LS-110 luminanssimittaria. Kyseisten mittalaitteiden toimintakuvaus ja tehdyt mittaukset on kuvattuna seuraavissa luvuissa.

13.1.1 Mittaukset Photo Research PR-900 videofotometrillä

PR-900 videofotometri on näytön spatiaaliseen, fotometriseen ja kolorimetriseen analysointiin soveltuva PC-pohjainen mittaussysteemi (kuva 37). Systeemi on rakennettu pääasiassa näyttöjen laaduntarkkailuun.



Kuva 37. PR-900 mittaussysteemi. Kuvassa on esitettynä jäähdytetty CCD-kamera, x-y-z-mikrosiirrin ja CRT-näyttö.

Mittauslaitteisto koostuu seuraavista komponenteista:

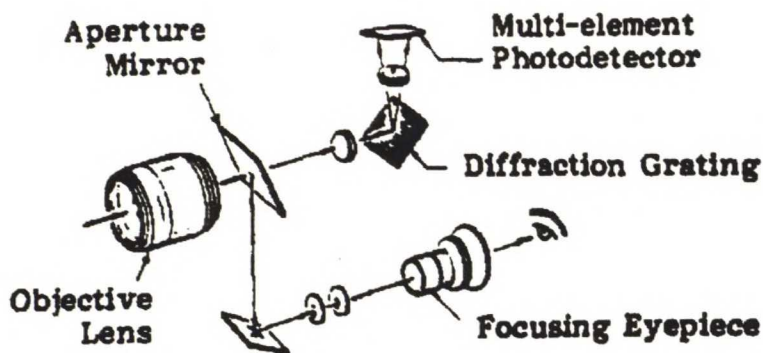
- CDD-kamera + optiikka,
- filtrit (7 kpl.),
- digitointikortti (512x512 resoluutiolla, 8 bittiä/pikseli),
- PC + RGB-CRT ja
- lisälaitteena x-y-z-mikrosiirrin.

Systeemiä kontrolloi VideoView- ohjelmisto, jonka kontrolloimana mitattavapinta tarkennetaan, mitataan ja analysoidaan. Mittaus koostuu seuraavista osavaiheista: mittauspinnan fokuusointi CCD-kameran ja x-y-z-mikro-siirtimen avulla, kuvauksen digitointi, mittausalueen määrittäminen digitaalikuvausta, mittauksen suoritus ja analysointi digitaalikuvausta./50/ Riippuen kamerasensoriikasta mittaussysteemin maksimaalinen luminanssiresoluutio on 0,0017 Cd/m² ja paikkaresoluutio 0,003 mm.

Photo Research:n PR-900 videofotometrillä tehdyt mittaukset tehtiin näyttöpinnan normaalin suunnasta pimeässä huoneessa. DOS- ja WIDOWS-tilasta tehtävän luminanssimaksimi mittauksen aikana näyttö oli tehdasesiasetuksessa. Mittaukset tehtiin yhdestä pisteestä näytön keskeltä (katso LIITE 1). Tehdasesiasetusta käytettiin mittauksien toistettavuuden varmistamiseksi. Jitter-mittaus suoritettiin mustasta pisteestä, taustan ollessa valkoinen tehdasesiasetuksessa WINDOWS-tilassa (katso LIITE 2). ISO:n Sae:n ja Eia:n mukaiset geometriset vääristymät määritettiin videofotometrillä ristikkokuvista (katso LIITE 2). Näytön spatiaalinen tarkkuus määritettiin vihermustasta taaajuuden suhteen muuttuvasta palkkikuvista videofotometrillä (tehdasasetus, WINDOWS-tila) (katso LIITE 3). Näytön CIE1931 väriavaruuden mittaustulokset ovat esitettynä liitteessä 4.

13.1.2 Mittaukset Photo Research PR-703 spektrometrillä

Spektrometri PR-703 on spektrianalyysiin, luminanssi- ja värimittauksiin soveltuva mittauslaite. Laitteen toiminta perustuu siihen, että laitteen optiikka kerää kerää mitattavan kohteen (esim. näyttö, paperi, valonlähde) valoenergian, jakaa sen spektraalikomponentteihin ja fokusoi tämän monielementtiseen fotodiodihilaan (kuva 38)./36/



Kuva 38. Spektroradiometrin toimintaperiaate/36/.

Laitteen ohjauskortti ohjaa mittapään sensoria ja muuttaa sisään tulevan signaalin digitaalimuotoiseksi PC:lle. Laitteen voi kalibroida tiettyyn valonlähteeseen (esim D65, D50 jne.). PR 703 soveltuu seuraavien laatusuureiden mittaukseen :

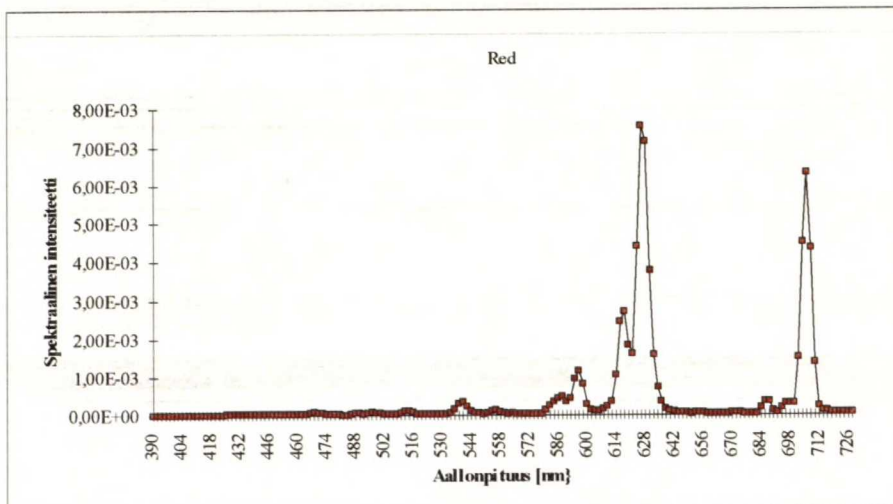
- kohteen spektraalinen sisältö aallonpituuden funktiona (390 nm ...730 nm),
- värilämpötila (K),
- luminanssi (Cd/m^2),
- värillisyyys (CIE xyY, CIE $u'v'$, CIE Luv, CIE Lab)
- transmittanssi ja reflektanssi.

Näytön väriavaruus ja värillisyyden isotrooppisuus mitattiin Photo- Reserch:n PR-703 A/PC spektroradiometriä. Näytöstä mitattiin CIE xyY ja Lab:n mukainen väriavaruus kalibroituna värilämpötilaan 6500 °K (katso LIITE 5). Värillisyyden ja luminanssin isotrooppisuus määritettiin 24:stä eri mittauspisteestä yli näyttöpinnan (katso LIITE 6 ja 7). Näytön fosforien värillisyyys mitattiin spektroradiometrillä kalibroidusta näytöstä värilämpötilassa 6500 °K, WINDOWS-tila (taulukko 16.). Kaikki spektroradiometrimittaukset tapahtuivat pimeässä huoneessa näytön ollessa ainoa valonlähde.

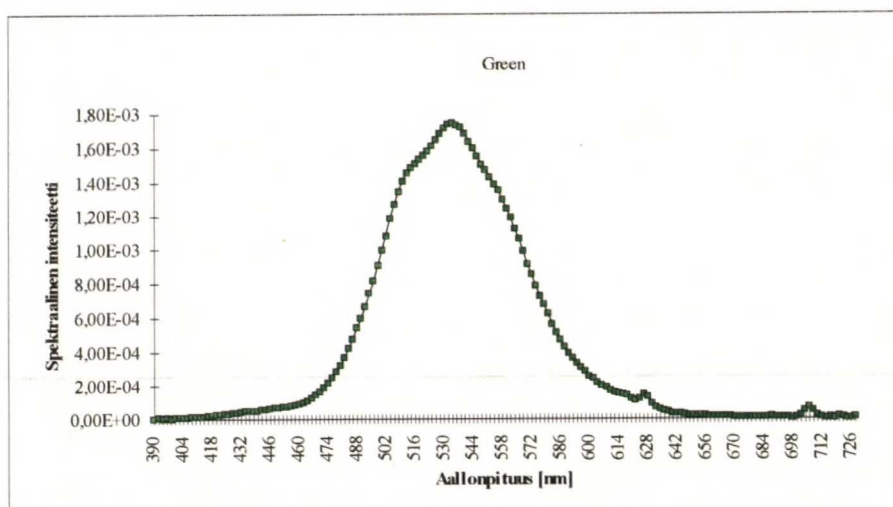
Taulukko 16. Näytön primäärifosforien CIE 1931 xy-värillisyyys.

	x	y
Red(R)	0,625	0,340
Green(G)	0,280	0,595
Blue(B)	0,155	0,070

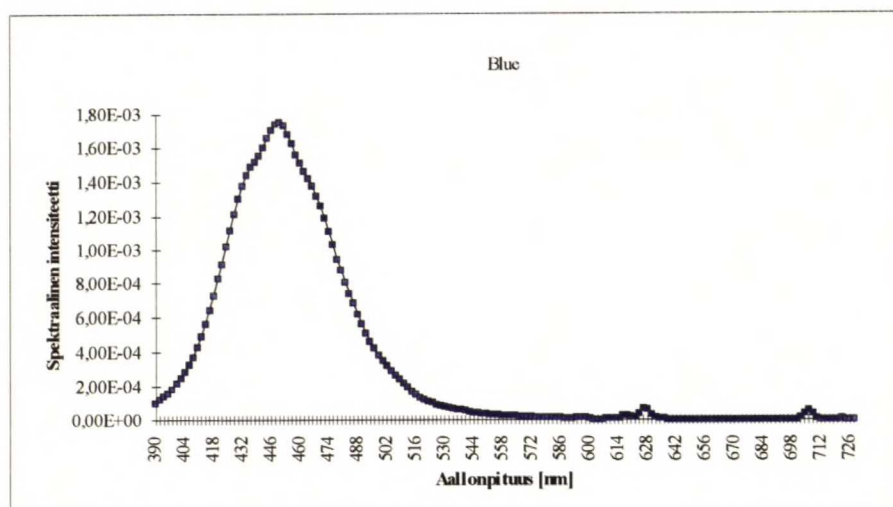
Fosforien kromaattisuuden perusteella fosforit tunnistettiin TRINITRON primäärifosforeiksi. Primäärifosforien spektraalinen intensiteetti aallonpituuden funktiona on tulostettu kuvissa 39-41.



Kuva 39. Punaisen primäärifosforin aallonpituusjakauma.

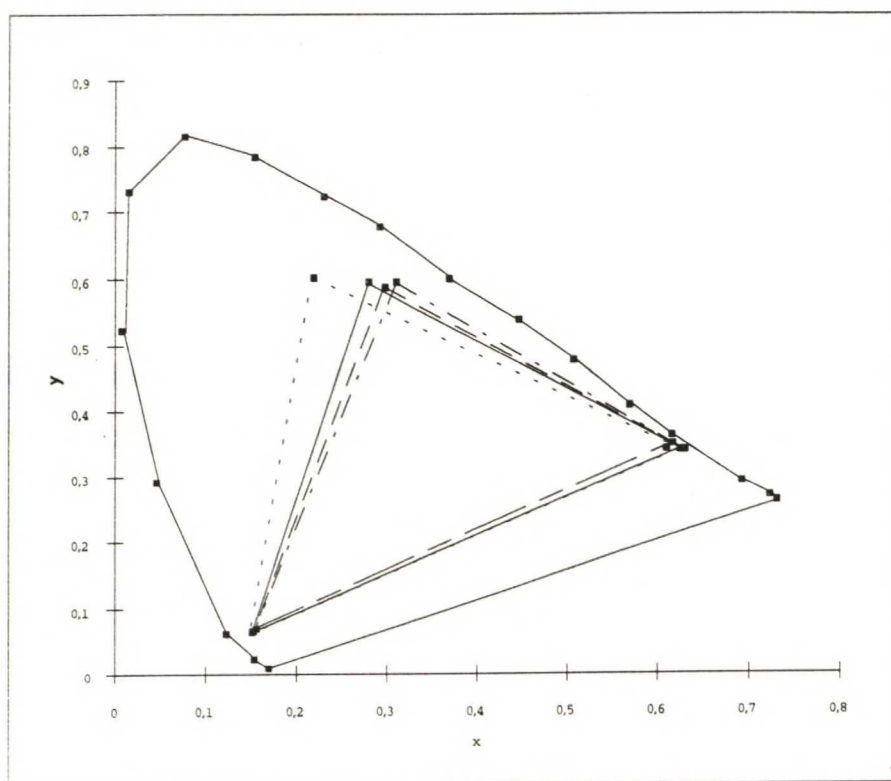


Kuva 40. Vihreän primäärifosforin aallonpituusjakauma.



Kuva 41. Sinisen primäärifosforin aallonpituusjakauma.

Monitorin primäärifosforien kromaattisuus "heijastuu" näytön väriavaruuden laajuudessa. Kuvassa 42 on esitettyä tunnettujen fosforien kromaattisuusalue CIE 1931 xy-kromaattisuusdiagrammissa.



TRINITRON —			BARGO			SMPTE - . - . -			HITACHI/IKEGAMI - - -		
	x	y		x	y		x	y		x	y
Red	0,625	0,34	Red	0,617	0,349	Red	0,63	0,34	Red	0,61	0,342
Green	0,28	0,595	Green	0,219	0,601	Green	0,31	0,595	Green	0,298	0,588
Blue	0,155	0,07	Blue	0,152	0,066	Blue	0,155	0,07	Blue	0,151	0,064

Kuva 42. TRINITRON, BARGO, HITACHI/IKEGAMI ja SMPTE-primäärifosforien vaikutus näytön kromaattisuuteen CIE 1931 korrdinaatistossa.

13.1.3 Mittaukset LS-110 luminanssimittarilla

LS-110 luminanssimittarin toiminta perustuu valonlähteen tai pinnan vaaleuden detektointiin silikonisen fotojohteen avulla. Kohteen valoenergia kohdistetaan fotojohteeseen 85 mm linssin avulla. Mittarin luminanssidynamiikka on 0,01 ... 999900 cd/m² (kuva 43) ja tarkkuus on +/- 2 % lukemasta./23/



Kuva 43. Minolta LS-110 luminanssimittari.

Luminanssin ryöminen ja kalibroidun näytön maksimiluminanssi mitattiin Minolta LS-110:llä. Lisäksi suoritettiin luminanssidynamiikan mittaus näytön ollessa kalibroitu- na värilämpötilaa 6500 °K (katso LIITE 1). Luminanssin ryömintä mittauksessa mit- tausaikana oli 1 h ja mittausfrekvenssin olessa kerran 6 minuuttissa (katso LIITE 6).

13.2 Näytön laadunmittauksen yhteenveto

Mittausten perusteella voidaan todeta seuraavaa:

1. Luminanssi:

Mitattu CRT-näytön maksimiluminanssi tehdasasetuksessa, WINDOWS-tilassa on 148,8 Cd/m², joka on keskimääräistä näyttöjen luminanssia korkeampi. On kuitenkin huomattavaa, että näytön kalibroinnin jälkeen luminanssitaso tulee laskemaan valkoisuuden muuttumisen ja gammakorjauksen johdosta.

Luminanssin ryöminen mitattuna luminanssihajontana mittauspisteessä mittaus- ajan funktiona oli 0,29 % mitatusta luminanssiarvosta. Ryömistä voidaan pitää merkityksettömänä.

Luminanssin isotrooppisuus mitattiin primääriväreillä punainen, vihreä ja sininen ja valkoisesta (kaikkien fosforien värinanto maksimissa). Mittauksista huomattiin, että näytön luminanssin tasaisuus on parhaimmillaan näytön keskellä ja heikkenee reuna-alueille mentäessä. Luminanssimittausalueita oli kaksi; yli koko näytön (25 mittauspisteestä) ja noin 15 cm x 15 cm alue näytön keskellä (9 mittauspistettä). Keskimmäistä aluetta tullaan hyödyntämään näytöllä tehtävissä parivertailuissa. Keskimmäisen alueen (A1) ja koko näytön (A2) välinen luminanssihajonnan erotus ilmaistuna prosentteina mitatusta osaväriluminanssista jakaantui seuraavasti:

	Valkoinen:	Punainen	Sininen:	Vihreä:
A1	5,1%	4,8 %	5,3 %	4,7 %
A2	4,1 %	3,9 %	3,9 %	4,6 %
A1-A2	1%	0,9 %	1,4 %	0,1 %

Mittauksista huomataan, että keskimääräinen luminanssipoikkeama keskialueella on 4,1 % . Samoin primäärifosforien välillä on hajontaa, jonka yhtenä syynä on luultavasti käytetyn mittaustaitteen LS-110 spektraalinenherkkyys, joka on painotunut vihreälle aallonpituusalueelle.

2. Värillisyy:

Punaisen , vihreän, sinisen ja valkoisen täysvärikentän värillisyyshajonta mitattiin kahdella eri mittalaitteella . Joista videofotometri PR-900 antoi huomattavasti pienemmän värillisyyshajonnan (keskimäärin 0,24 %) yli näyttöalueen verratuna spektrometrillä PR-703 mitattuun värillisyyshajontaa (keskimäärin 2,2 %). Laitteista PR-900 tulosta voidaan pitää luotettavampana, laitteen tarkkuuden johdosta. Näytön primäärifosforit todennetaan TRINITRON- fosforeiksi.

3. Geometriset vääristymät:

Näyttö täyttää geometrinen vaatimusten osalta SAE:n, EIA:n ja ISO:n standardit.

13.3 Näytön kalibrointi

Näytön valaistusolosuhteen ja taustaväri tulee olla vakiolliset toistettavien ja luotettavien laadunmittauksien ja -arviontien mahdollistamiseksi. Parivertailujen taustanväri säädettiin keskiharmaaksi ja näytön värillisyyys valonlähteen D65 mukaiseksi (värilämpötila 6500 K) . Taulukossa 17 on visualisoinnissa käytetyt värillisyy- ja luminanssitila-asetukset.

Taulukko 17 .Näytön visualisointitilan asetukset.

Lmax	104,0	
Lmin	0,10	
Dynaaminen alue	103,90	
Värillisyy (D65)	$x = 0,31 \quad y = 0,33$	
Taustan väri	$L^* = 57,76 \quad a^* = -1,86 \quad b^* = -1,58$	
Gamma	2,12 (korjattu)	
Ympäristö	pimeä huone	
Fosforit	Red	$x = 0,625 \quad y = 0,340$
	Green	$x = 0,280 \quad y = 0,595$
	Blue	$x = 0,155 \quad y = 0,070$

Monitorin maksimidensiteetti voidaan laskea luminanssimaksimin ja -minimin perusteella kaavalla 49 :

$$D_{\max} = -\log\left(\frac{L_{\min}}{L_{\max}}\right) \quad (49),$$

missä

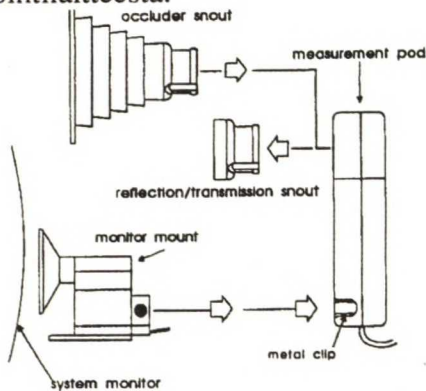
L_{\min} = minimiluminanssi ja

L_{\max} = maksimiluminanssi

Täten CRT-monitorille saadaan maksimidensiteetiksi 3 densiteettiyksikköä, joka saavutettiin oloissa, jossa hajavallo oli eliminoitu. Mitattu maksimidensiteetti on normaaleja näyttöjen densiteettiä (1-2 D) selvästi suurempi. Kolme densiteettiä vastaa tyypillistä filmin densiteettiä l. näytön sävyalue on täten riittävä. Värillisyytilan mittaukset ja säädöt tehtiin spektroradiometrin (Photo Research) ja Sequel kalibrointilaitteiston avulla. Kalibrointi perustui ajatukselle, että suorittamalla osaväreille R, G ja B gammakorjaus ja säätämällä valkoinen väri (väri, jolloin kaikki elektronit ovat maksimissa $R=G=B=255$) tietyn standardivalonlähteen mukaiseen tilaan kokonaisvärillisyyden kalibroitu valitun värilämpötilan mukaiseksi. Tällöin monitorikuvan värillisyyden voidaan laskea fotometrimittauksen, fosforien tunnettujen kromaattisuuksien ja normalisointi l. skaalaustekijöiden perusteella.

13.3.1 Näytön kalibrointi System Calibrator- laitteen ja MonCal- ohjelmiston avulla

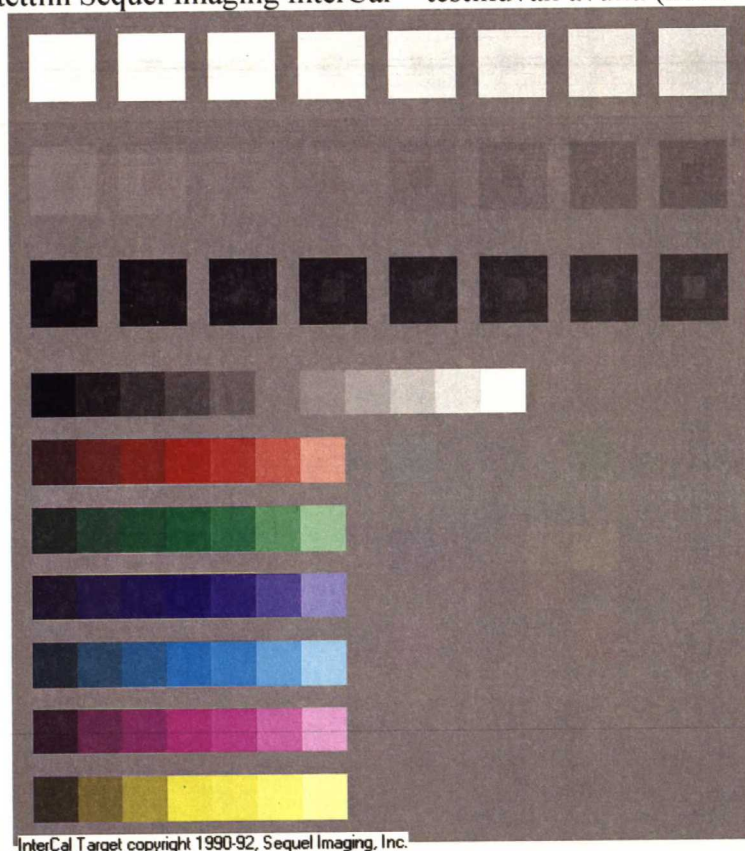
Näytön kalibroinnissa käytettiin Sequel Imaging kalibrointipakettia, johon kuuluu kalibrointilaitte (GIZ-CL-MRT) ja PC-yhteensopivaohjelmisto (MonCal 3.0). Kalibrointilaitte soveltuu monitorin värillisyyden mittaukseen ja säätöön, lisäksi laitetta voidaan käyttää ei itsesäteilevän lähteen (paperi, filmi) heijastus- ja transmissiomittauksiin. Laitteisto mahdollistaa erilaisten värilähteitten (näyttö, paperi) mittaamisen samalla spektraalisella herkkyydellä. Mittapäiden spektraaliset herkkyydsfunktioit ovat lineaarisessa suhteessa CIE väriavaruuden värinsovitussfunktioihin. Kuvassa 44 on kuvaus System Calibrator-kalibrointilaitteesta.



Kuva 44. Sequel näyttökalibraattori.

13.3.2 Kalibrointiproseduuri

Kalibroinnissa MonCal-ohjelmiston avulla mitattiin näytön gamma, monitorin kromaattisuus ja laskettiin korjaustekijät näytön linearisoimiseksi. Näytön subjektiivinen säätö suoritettiin Sequel Imaging InterCal™ testikuvan avulla (kuva 45).



InterCal Target copyright 1990-92, Sequel Imaging, Inc.

Kuva 45. Näytön subjektiiviseen säätön tarkoitettu testikuva. Kirkkaat sävyt, keskisävyt ja matalat sävyt säädetään JND-erojen perusteella.

Ensimmäinen vaihe näytön kalibroinnissa oli näytön preferenssien asetus: valaistusolosuhteen ja työskentelytilan gamman säätö. Valaistusolosuhteilla tarkoitetaan tässä ympäröivää valaistusta, joka valittiin pimeäksi (kerroin = 1,2). Valitun valaistusolosuhteen kertoimella kerrotaan työskentely gamma-arvo (Working Gamma), joka asetettiin videokuvien esitykseen soveltuvaksi ($\gamma=2,2$). Työskentelytilan gamma edustaa käyttäjän operointiympäristöä. Gammakertoimien asetuksen jälkeen säädettiin subjektiivisesti monitorin analogisesti kotrolloitavat muuttujat, kontrasti, kirkkaus ja näytön luminanssi, InterCal testikuvan mukaan.

Esiasetusten jälkeen näyttö voidaan kalibroida automaattisesti. Automaattisen kalibroinnin ensimmäisenä vaiheena on mittausrakenteen pimeävirran mittaaminen. Pimeävirta on elektroniikkakomponenttien generoimaa sähköistä kohinaa. Pimeävirran mittauksella kompensoidaan kalibraattorin sisäinen elektroninen kohina valon osuessa laitteen mittapäähän. Mittaus suoritettiin siten, että detektoriin ei tullut ulkoista valoa. Pimeävirran tarkistuksen jälkeen mittalaite mittaa monitorin virkistystaajuuden, jolloin

kalibraattori synkronoi itsensä lähteen (näyttö) virkistystaajuuteen, mittaustarkkuuden parantamiseksi.

Kolmas vaihe kalibroinnissa on näytön valkoisuuden(white point) määrittäminen , joka tehtiin useista peräkkäisistä harmaasävykentistä ja sinisen, vihreän ja punaisen täyspeitteisistä kentistä. Saatua dataa käytetään 100 % luminanssin referenssipisteenä, sekä fosforien kromaattisuuskoordinaattien laskentaan ja työskentelygamman linearisoimiseen.

Viimeisenä vaiheena oli näytön värilämpötilan asetus skaalalla 4000 °K .. 10000 °K. Värilämpötila asetettiin 6500 °K, joka vastaa D65 valonlähteen värillisyyttä. Näiden proseduurien jälkeen näyttö on kalibroitu D65 mukaiseksi valonlähteeksi.

Värikoordinaattien transformaationlaskennan tuloksena saatiin kertoimet lineaarisille yhtälöryhmille (yhtälöt 50-51):

$$\begin{aligned} X &= a_1R + a_2G + a_3B \\ Y &= b_1R + b_2G + b_3B \\ Z &= c_1R + c_2G + c_3B \end{aligned} \quad (50)$$

$$\begin{aligned} R &= d_1R + d_2G + d_3B \\ G &= e_1R + e_2G + e_3B \\ B &= f_1R + f_2G + f_3B \end{aligned} \quad (51)$$

Yhtälöä 50 voidaan kuvata matriitulona:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (52)$$

Säädetyin monitorin valkoisen värin tristimulusarvojen ollessa:

$$\begin{aligned} X &= 98,84 \\ Y &= 104,00 \\ Z &= 113,26 \end{aligned}$$

ja tuntemalla primäärifosforien tristimulusarvot saadaan transformaatiomatriisiin T:n arvoksi:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1924 & 0,1282 & 0,0674 \\ 0,1047 & 0,2725 & 0,0304 \\ 0,0108 & 0,0573 & 0,3768 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

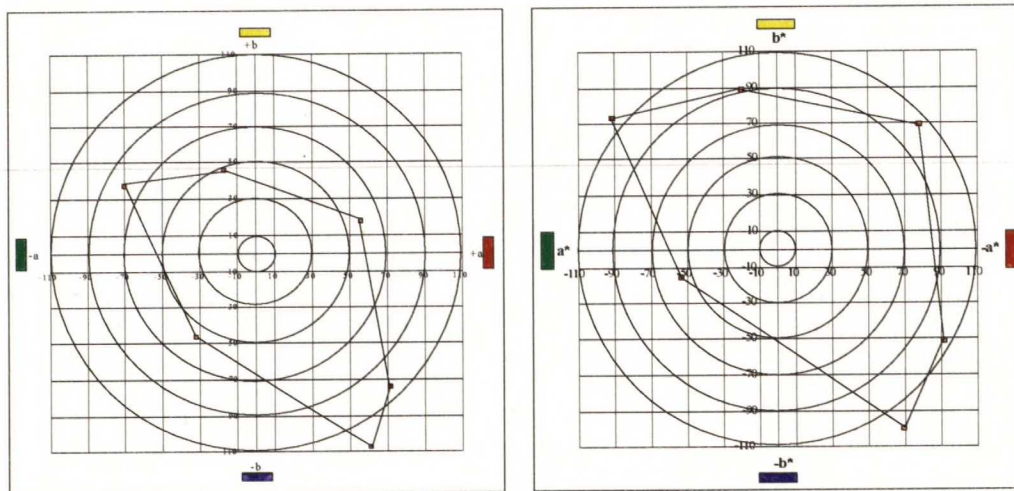
Muunnostransformaatiomatriisi tristimulusarvoista XYZ RGB-avaruuteen saadaan edellisen matriisin käänteismatriisilla T^{-1} :

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (53)$$

Ratkaisemalla käänteismatriisi saadaan:

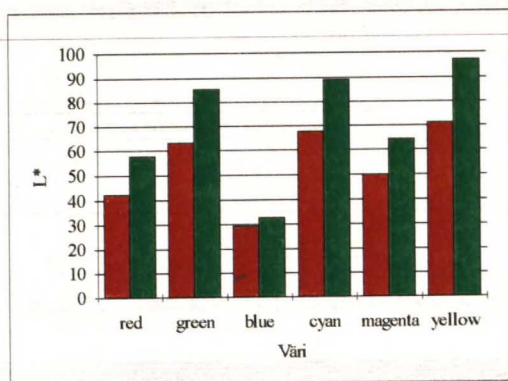
$$\begin{bmatrix} R \\ B \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6,9083 & -3,0414 & -0,9924 \\ -2,6777 & 4,9120 & 0,0828 \\ 0,2096 & -0,6612 & 2,6755 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Tämän jälkeen monitorille voidaan generoida haluttu väri, kun tunnetaan tristimulusarvojen XYZ ja RGB-avaruuden välinen relaatio. Dilomityössä tehtiin EXCEL-taulukkolaskentarutiini, joka muuntaa käyttäjän antaman CIE 1931 xyY kromaattisuus arvot tristimulusarvoiksi XYZ (CIE 1931), CIE 1976 $u', v',$ CIELab- ja CIELuv-arvoiksi. Rutiini laskee XYZ-arvojen perusteella muunnoksen monitorin RGB-arvoiksi. Tämän lisäksi voidaan laskea konversion RGB \rightarrow XYZ. Kuvissa 46-47 on näytön CIE a^*b^* - väriavaruus ennen kalibrointia ja kalibroinnin jälkeen.



Kuvat 46-47. Näytön kalibroinnin vaikutus näytön väriavaruuteen. Vasemmalla kalibroimattoman näytön väriavaruus ja oikealla väriavaruus kalibroidussa tilassa.

Huomataan, että kalibrointi on laajentanut kaikkien osavärien kylläisyyttä, parhaimmillaan kylläisyydessä saavutettu parannus on noin 20 yksikköä. Myös värien vaaleus L^* on kasvanut kalibroinnin myötä (kuva 48).



ΔL +15 +22 +3 +21 +14 +26

Kuva 48. Kalibroinnin vaikutus CIE L* arvoon, kalibroidun näytön L*-arvot on ilmaistu kuvaajassa vihreällä. Kuvan alla olevat luvut kuvaavat muutosmäärää.

Kalibroinnin vaikutus on ollut suurin syaanilla, keltaisella ja vihreällä värillä. Pienin muutos on tapahtunut sinisellä primäärivärillä.

13.3 Paperipohjien valinta ja laatuominaisuuksien mittaus

Visualisoitavia paperipohjia valittiin yhteensä 14 kpl, joista kaksi (10 & 14) on uusiopapereita, yksi (11) on sanomalehtipaperi, kolme korkeakiiltoista (2, 4 & 7), yksi standardipaperi (4) (taulukko 18).

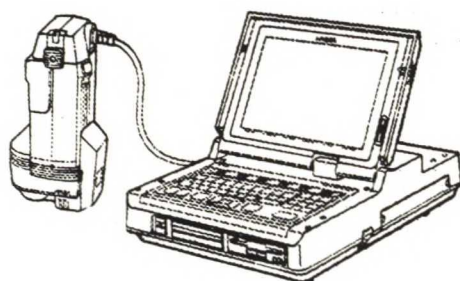
Taulukko 18. Visualisointiasemaan syötetyt paperipohjat.

	Nimike	Neliömassa (g/m ²)
1	Master Art matta	115 g/m ²
2	Magic Gloss	90 g/m ²
3	Griffin Art matta	100 g/m ²
4	APCO II/II	145 g/m ²
5	Griffin Art	100 g/m ²
6	Griffin Offset	100 g/m ²
7	Parilux GL	135 g/m ²
8	Gallerie Art silk	100 g/m ²
9	QMS	75 g/m ²
10	Mühlenbach (recycle)	80 g/m ²
11	Kajaani	40 g/m ²
12	Double coated silk	90 g/m ²
13	Xerox	80 g/m ²
14	Xerox CK (recycle)	80 g/m ²

Kustakin digitoitavasta paperista mitattiin seuraavat laatuominaisuudet:

- CIE $L^*a^*b^*$ - väriavaruuden mukainen värillisuus,
- pinnan karheus (R_a),
- kiilto ($75^\circ/75^\circ$ ja $45^\circ/45^\circ$ geometrioilla)

Saatua laadunmittausdataa käytetään paperien ja digitoitien MDS-analyysistä saatavien dimensiokoordinaattien identifioinnissa ja korrelaatioiden laskennassa. Digitoitavien paperien värillisuusmittaukset tehtiin Minolta CM-1000 spektrofotometrillä (kuva 49):



Kuva 49. CM-1000 spektrofotometri. Mittausstandardina oli valonlähde D65 ja mittaussapertuuri kokona 2° .

CM-1000 spektroradiometri mittaa kohteen värillisyyden aallonpituusalueella 400 ... 700 nm mittausalueelta, jonka säde on 4 mm. Laitteen detektorina on silikoni- fotodiodimatriisi. Valonlähteenä käytetään laitteen diffuusia pulssi Xenon-Arcon lampua (PXA). Mittauksessa mitattavasta pinnasta heijastuneesta komponentista vain pinnan normaalin suuntainen valo kerätään detektoriin (S1). PXA lampun emittoima valo mitataan sensorilla S2. Nämä sensorit muuttavat vastaanotetun valon virraksi, jonka voimakkuus on suoraan verrannollinen valonvoimakkuuteen. Virta-arvot muutetaan suhteelliseksi analogiseksi jännitteiksi, jotka muutetaan A/D-muuntimen avulla digitaalisignaaliksi. Laitteen mikrotietokone laskee spektraalisen heijastuksen jakamalla signaalin S1 signaalilla S2. Laskettua dataa hyödynnetään edelleen värillisuuskoordinaattien laskennassa./53/

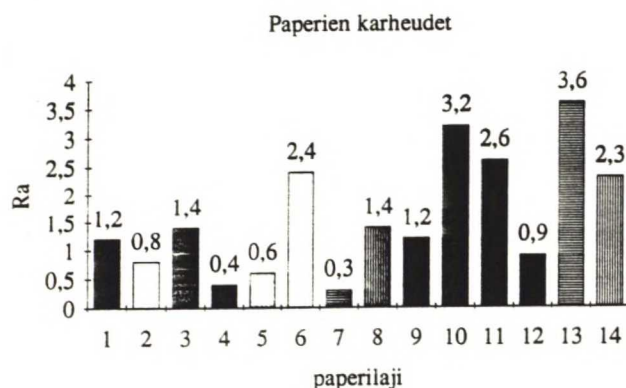
Pinnankarheuden tunnusluvut mitattiin Mitutoyo Surftester 402 pinnankarheusmittarilla. Mittalaitteen anturina on timanttineula (kärjen pyöristyssäde $5 \mu\text{m}$, mittaussuoritus 4 mN). Mittapää mittaa pinnan karheuden käyttäjän antamalta mittaussuoritusmatkalta ja muodostaa mittauksesta kaksidimensionaalisen karheusprofiilin. Systemi laskee mitatusta karheusprofiilista annetut karheusparametrit, esim R_a ./55/ Parametri R_a on paperin karheusprofiilien poikkeamien aritmeettinen keskiarvo keskiviivaan nähden (kaava 54):

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |f(x)| dx \quad (54),$$

jossa

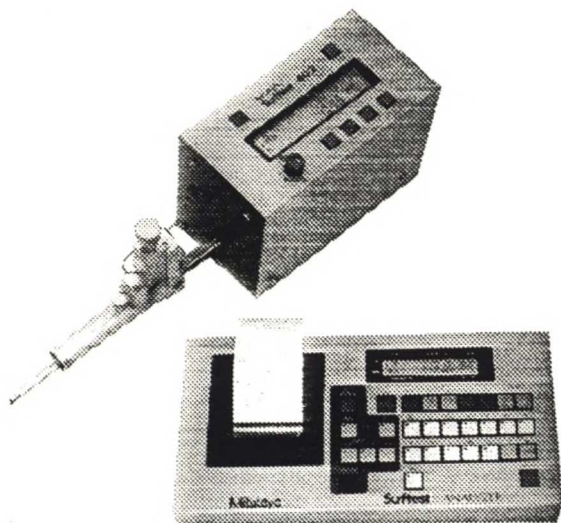
l_m = mittaussmatka

Ra laskennassa mittaussmatka oli 4mm, suodatusarvoa 0,8 mm. Kuvassa 50 on mitatut paperien Ra arvot suodatusarvolla 0,8 mm.



Kuva 50. Paperiorginaalien karheusjakauma. Yksi Ra -yksikkö vastaa 1 μm .

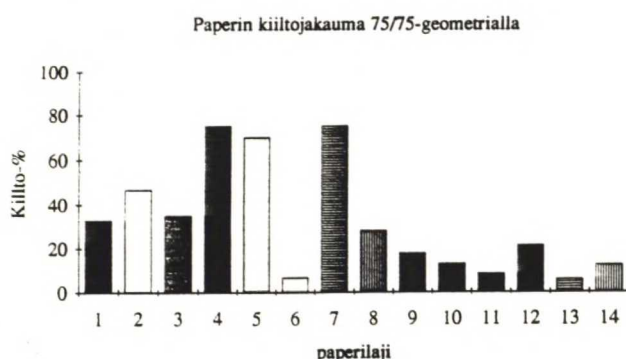
Karheusmittalaitteen standardikokoonpanoon oli koejärjestelyssä lisäksi liitettynä A/D-muunnin ja PC karheusprofiilin digitoimiseksi. Kuvassa 51 on kuvattuna Mitutyö 402 mittalaite ja analysaattori.



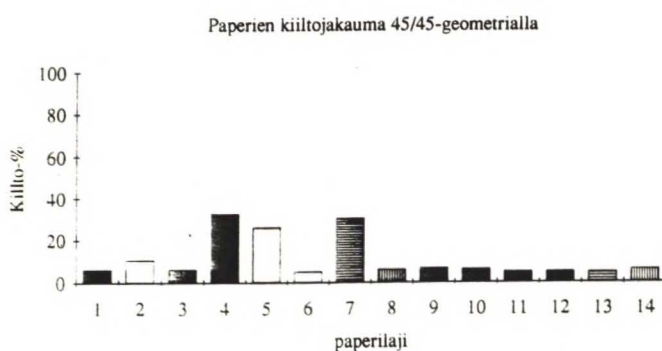
Kuva 51. Mitutyö karheudenmittalaite./66/

Paperien kiilto mitattiin Macbeth LabGloss kiiltomittarilla kahdella eri kulmageometrialla ($75^\circ / 75^\circ$ kuva 52 ja $45^\circ / 45^\circ$ kuva 53). Macbeth kiiltomittaria on kaksoissädeittari eli Tungsten halogeenilampuista tuleva valo ohjataan diffuuserin ja kapean raon kautta mitattavaan pintaan valitussa mittauskulmassa. Heijastunut valo kerätään detektoriin pinnan normaaliin nähden samassa kulmassa kuin tuleva valo (mittapäät $45/45$ ja

75/75). Mittapäässä 45/0 valo heijastetaan pintaan 45 ° kulmassa ja detektio tapahtuu 0 ° kulmassa.



Kuva 52. Paperiorginaalien kiiltomittaukset 75°/75°-geometriallla.



Kuva 53. Paperiorginaalien kiiltomittaukset 45°/45°-geometriallla.

Papereita 2, 4,5 ja 7 voidaan pitää korkeakiiltoisina paperien 1, 6, 8-14 ollessa lähinnä kiilloltaan mattalaatua. Vertaamalla paperien karheusarvoja ja kiiltoprosentteja voidaan todeta paperien kiillon ja karheuden välinen negatiivinen korrelaatio eli karheuden kasvaessa kiilto pääsääntöisesti laskee (taulukko 19).

Taulukko 19. Karheuden ja kiillonvälinen korrelaatio.

	<i>Ra</i>	75°/75°	45°/45°
<i>Ra</i>	1,00		
75°/75°	-0,82	1,00	
45°/45°	-0,65	0,92	1,00

Liitteeseen 9 on tulostettu paperiorginaalien karheusprofiilit suodatusarvolla 2,5. Karheusprofiileista nähdään kiillon ja karheuden välinen relaatio. Korkeakiiltoisilla papereilla karheusvaihtelu on huomattavasti pienempää kuin mattapapereilla. Lisäksi mattapapereissa on selvää karheuden jaksollisuutta (vert. siniaalto).

Taulukossa 20 on esitetty orginaalipapereista mitattu värillisyyss, karheus ja kiilto.

Taulukko 20. Digitoitujen paperien värillisyy-, karkeus- ja kiiltokeskiarvot. $L^*a^*b^*$

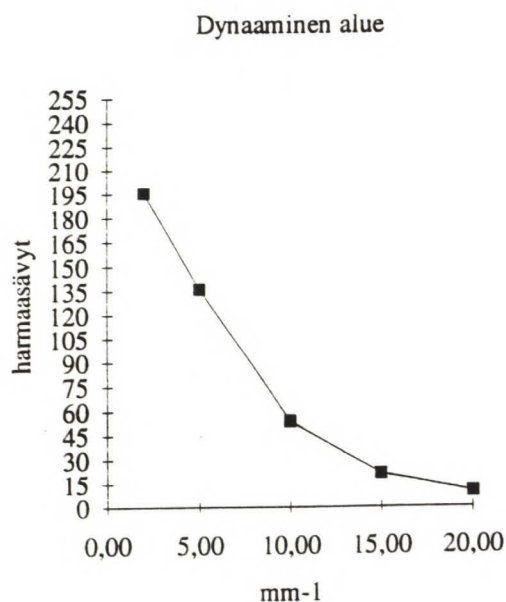
ovat CIE-värillisyyssstandardin mukaiset värikoordinaatit ja kiilto-% on paperin kiilto $75^\circ/75^\circ$ - ja $45^\circ/45^\circ$ - mittausgeometriassa.

Paperi	L^*	a^*	b^*	R_a	$75^\circ/0^\circ$	$45^\circ/45^\circ$
1 Master Art matta	93,1	0,8	-1,9	1,2	32,9	6
2 Magic Gloss	90,8	0,0	-2,1	0,8	46,8	10,4
3 Griffin Art matta	91,3	0,4	-2,5	1,4	35,2	6
4 APCO	92,2	-0,6	2,7	0,4	75,1	32,6
5 Griffin Art	90,9	0,3	-3,3	0,6	70	26
6 Griffin Offset	90,7	1,0	-2,1	2,4	6,6	4,9
7 Parilux GL	92,7	0,7	-2,4	0,3	75,2	30,5
8 Gallerie Art silk	91,6	0,1	-2,0	1,4	28,2	5,9
9 QMS	90,4	0,9	-4,2	1,2	17,8	6,4
10 Mühlenbach (recycle)	83,4	-0,2	8,2	3,2	13	6
11 Kajaani (sanomalehti)	81,0	-0,1	5,7	2,6	8,4	4,7
12 Double coated silk	90,2	-0,2	-2,4	0,9	21,4	5
13 Xerox	89,3	0,0	-2,4	3,6	5,7	4,6
14 Xerox CK (recycle)	91,0	0,2	-2,2	2,3	12,4	5,9

13.4 Paperipohjien Digitointi

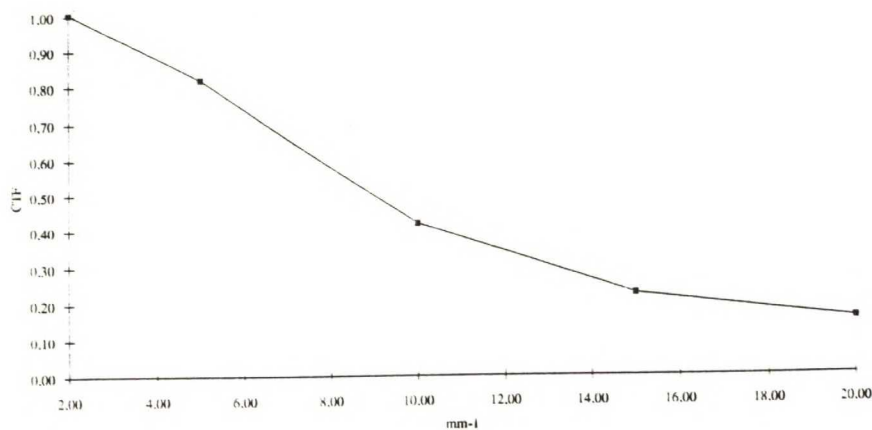
Visualisointiasemassa tarkasteltavat paperipohjat digitoitiin matriisi CCD-kameralla (COHU 4712). Kameran analogisen signaalin muunto digitaaliseen muotoon tehtiin GRAFI-ohjelmistossa, joka käyttää PIP 1024b framegrabber-korttia digitointitarkkuudella 8 bittiä/pikseli kokoon 512×512 pikseliä. Digitoinnin offset ja gain (signaalin pohja- ja huipputason säädöt) säädettiin siten, että maksimoitiin kuvauspinnan dynaaminen alue (tässä harmaasävyskala välillä 0 .. 255). Kameran sävyntoistoon vaikuttava gamma asetettiin arvoon 1. Tällöin kameran sävyntoisto on lineaarinen.

Digitointi suoritettiin sekä diffuusissa, että suunnatussa valaistuksessa. CCD-kameran optiikkana käytettiin CANON:n FD 50 mm makrolinssiä (aukko = 5,6) ja loittoa. Digitointialueen koko paperissa oli 10 mm x 10 mm ja näyttökuvaus visualisointiasemassa 100 mm x 100 mm. Tällöin paperista kuvattu pienin elementti on 0,02 mm. Kameran MTF ja spektraalinen herkkyys on esitetty kuvissa 23, 26. Digitointitilanteessa kuvan 26 kameran spektraalisesta herkkyyskäyrästä aallonpituudet > 700 nm poistettiin IR-suodinfiltterin avulla. Kuvaussysteemin dynaaminen alue, CTF ja SNR mitattiin taajuuden suhteen muuttuvasta testipalkistosta ($f = 2, 5, 10, 15$ ja 20 mm^{-1}) (kuvat 54-56):



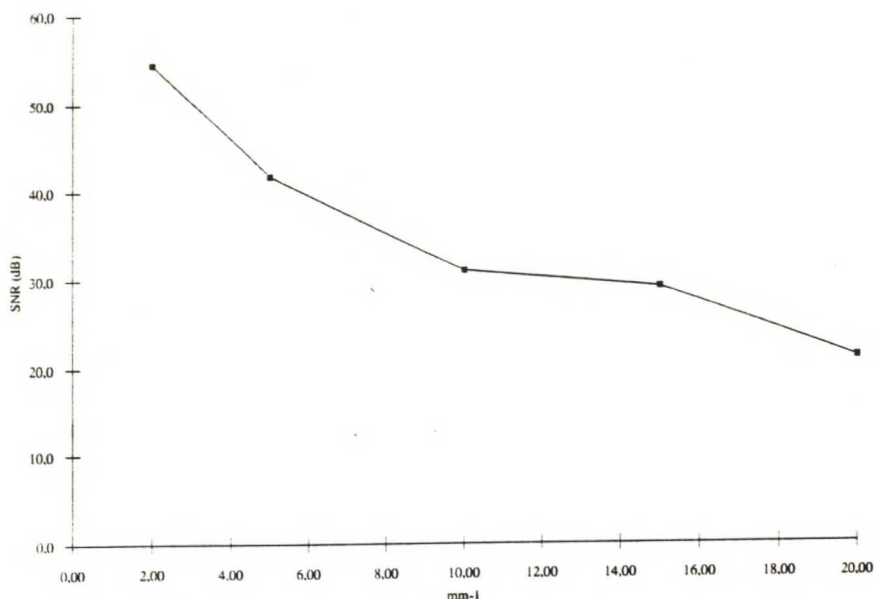
Kuva 54. Digitointisysteemin dynaamisen alueen muutos paikkataajuuden funktiona.

Havaitaan, että systeemin dynaaminen alue pienenee paikkataajuuden funktiona. Dynamiikka puolittuu likimän paikkataajuuden arvolla 7 linjaa/mm. Signaalin erotuskyky alkaa sävyluvusta 15 l. systeemi ei havaitse tätä alhaisempia sävyjä.



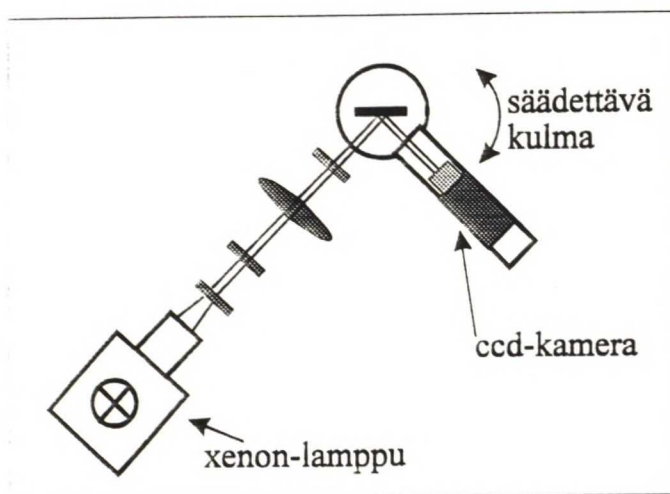
Kuva 55. Kuvaussysteemin CTF.

Systeemin erotuskykyä voidaan pitää 20 l/mm (0,05 mm). CTF laskee puoleen ~ paikkataajuudella 9 linjaa/mm.



Kuva 56. CCD kamerasysteemin SNR taajuden funktiona.

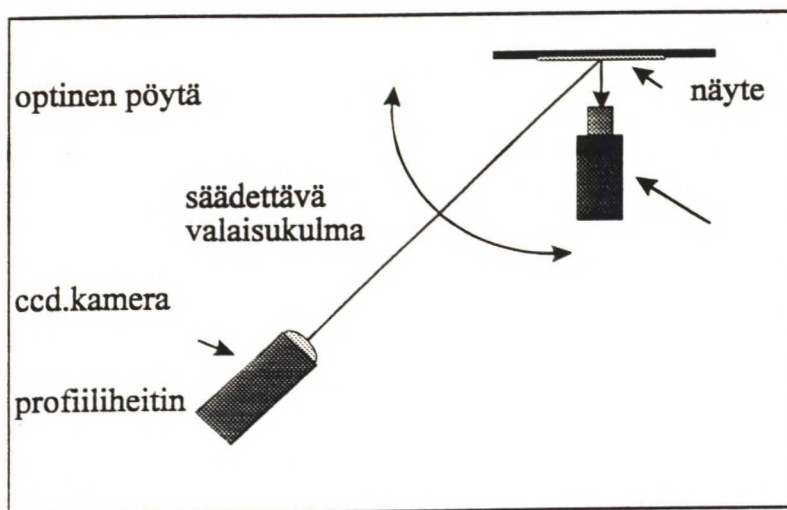
Suunnatussa valaistuksessa tapahtuva digitointi tehtiin ensin kiinteässä valaistuskulmassa ja muuttuvalla kuvauskulmalla (kuva 57).



Kuva 57. Kuvien digitointijärjestely, jossa valaisukulma on vakio detektionkulman oleessa muunneltava.

Systeemeissä oli ongelmina valonlähteenä käytettävän Xenon-lampun epästabiilisuus ja tarkan kuvausalan pieneneminen kuvauskulman muuttuessa. Lisäksi systeemeissä ei voida hallitusti kontrolloida valonvoimakkuutta, koska valonvoimakkuuden säätö tehdään harmaasuotimilla. Järjestelyn etuna on mikroruuvi perusteinen kuvauskulman säätö, joka mahdollistaa esim. heijastusindikaatriksen tarkan kuvauksen. Järjestelyä voidaan käyttää haluttaessa visualisoida paperin kiiltovaihtelua pinnan normaalista poikkeavissa detektiokulmissa pienillä kulmamuutoksilla. Suunnattu digitointi päätettiin tehdä Tarja Peromaan tutkimuksia varten rakennetussa valaisujärjestelyssä (kuva 58). Tällöin on

mahdollista muuttaa paperipinnan valaisukulmaa, digitointikulman pysyessä vakiollisena pinnan normaalin suuntaisena ja säätää hehkulamppuvalonlähteen intensiteettiä portaattomasti. Pinnan normaalinsuuntainen detektio mahdollistaa paperin "luonnollisen" kuvauksen. Paperin rakenne ei vääristy ja tarkan kuva-ala säilyy maksimaalisena. Digitointijärjestelyssä valonlähteenä oli hehkulamppu. Hehkulampun spektri on lineaarinen, eikä sisällä haitallisia spektriipukkeja kuten Xenon-lamppu.



Kuva 58. Paperipohjien digitoinnissa käytetty kuvausjärjestely, jossa valaisukulmaa voidaan muuttaa 10° asteen välein digitointikulman ollessa vakio 0° .

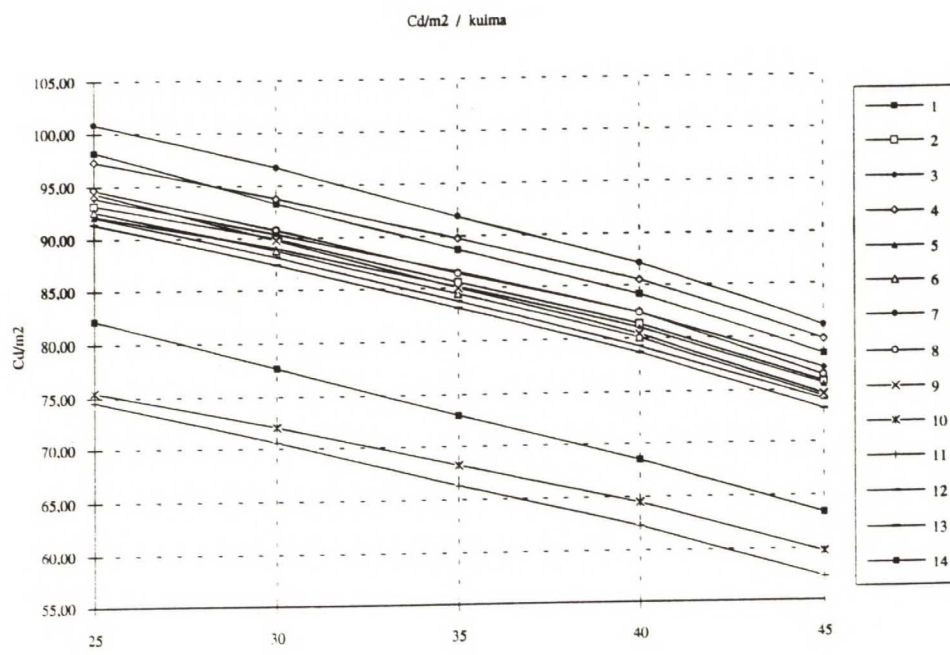
Suunnattu digitointi suoritettiin seuraavilla geometrioilla (taulukko 21):

Taulukko 21. Digitointi geometriat valonlähteen ollessa suunnattu.

valaisukulma	digitointikulma
45 astetta	0 astetta
40 - " -	- " -
35 - " -	- " -
30 - " -	- " -
25 - " -	- " -

Järjestelyn suurimpana ongelmana oli se, että papereita ei voitu digitoida heijastusmaksimissa $0^\circ / 0^\circ$. Kyseinen kulma on paras, jos halutaan saada paperin spekulariikiilto pinnan normaalin suuntaisessa detektiossa. Koejärjestelyssä kokeiltiin digitointigeometriaa $45^\circ / 45^\circ$, jonka suurin ongelma oli pinnan tarkan detektion pieneneminen noin viidesosaan suhteessa kuvauksen leveyteen.

Valaistuksen intensiteetti säädettiin siten, että korkeakiiltoisimman paperin (Parilux GL) luminanssi oli noin 100 Cd/m². Tämä on lähellä näytön luminanssi maksimia D65-tilassa (~ 104 Cd/m²). Kuvassa 59 ja taulukossa 22 on esitetty digitoitujen paperien luminanssitasot eri digitoitungeometrioidella.



Kuva 59. Digitoitujen paperien luminanssitasot [Cd/m²] digitoitukulman [°] funktiona

Taulukko 22. Digitoitujen paperien luminanssit eri kulmageometrioidella.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
25	98,16	93,18	93,88	97,27	92,17	92,59	100,83	94,62	94,34	75,49	74,58	92,12	91,41	82,14
30	93,26	89,92	90,37	93,75	89,00	88,79	96,66	90,75	89,79	72,06	70,58	88,15	87,41	77,69
35	88,69	85,54	86,55	89,76	85,12	84,42	91,84	86,41	84,99	68,22	66,31	83,69	83,07	73,00
40	84,12	81,32	82,34	85,51	80,97	80,05	87,13	82,34	80,39	64,48	62,30	79,26	78,72	68,48
45	78,44	75,82	77,10	79,74	75,60	74,40	81,01	76,40	74,62	59,74	57,27	74,11	73,23	63,38

1= Master Art matta

2= Magic Gloss

3= Griffin Art matta

4= APCO

5= Griffin Art

6= Griffin Offset

7= Parilux GL

8= Gallerie Art silk

9= QMS

10= Mühlenbach (recycle)

11= Kajaani (sanomalehti)

12= Double coated silk

13= Xerox

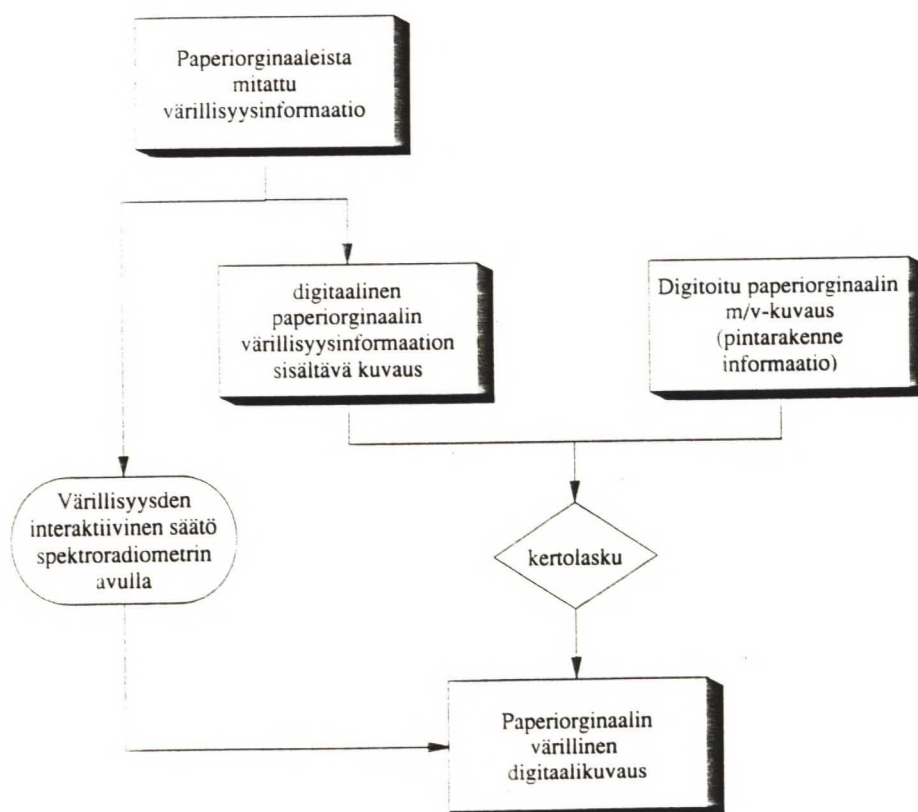
14= Xerox CK (recycle)

Diffuusi digitointi suoritettiin reprojektiivisellä, jossa kamera on pintaan nähden kohti suorassa asennossa ja valaisu pintaan nähden 45 ° kulmassa (neljällä hehkulampulla).

13.5 Digitoitujen paperipohjien säätö

Digitoinnin tuloksena saatu 512 x 512 pikselin harmaasävy raakakuvadata (*.bw) muutettiin TIF-kuvaformaattiin, jonka esitystä kuvien visualisointi ympäristönä käytettävä

PhotoStyler-kuvankäsittelyohjelma tukee. Tämän jälkeen digitoitu paperin pintarakenne kooltaan 512*512 kasvatettiin kokoon 1024*512. Tällöin paperipohjalle jouduttiin suorittamaan monistus kokoon 1024*512 ja syntyneen monistuelementtien rajapinnan häivytyks: peilikuvaamalla. Yksittäinen digitoitu m/v-kuva tarvitsee talletukseen 256 ktavua, joten kokonaisuutena ennen kuvien väriensäätöä digitoidut paperipohjat veivät 15,36 Mtavua. Väriensäädön ja kuvakoon monistuksen jälkeen yksittäisen kuvan vaatima muistitarve kasvoi 1,57 Mtavuun eli kokonaisuutena (60 x 1,57 Mtavua) 94,2 Mtavua. Kompressoimalla kuvat LZW- kompression avulla kuvien vaatima tilamäärä saatiin vähenemään noin puoleen alkuperäisestä, jolloin kuva-arkistona voitiin käyttää visualisointiaseman omaa kovalevyasemaa (230 Mtavua). Käytetty LZW- kompressio ei ole niin tehokas kuin JPEG-kompressio, mutta takaa kuvainformaation täydellisen säilymisen. Digitointien värillisyyttä säädettiin vastaamaan näytöllä orginaalipapereiden värillisyyttä. Sääto tapahtui PhotoStyler-kuvankäsittelyohjelmassa näytöstä spektroradiometrilla tehtyjen mittausten perusteella interaktiivisesti säätämällä kuvan kokonaisvärillisyyttä RGB-osaväri- suhteita muuttamalla (kuva 60). Säädön tavoitteena oli saada digitoidut paperipohjat vastaamaan värillisyyden suhteen mahdollisimman hyvin paperiorginaaleja. Ongelma oli se, että digitointi tehti m/v-kameralla, jolloin menetettiin värikontrastin kannalta tarpeellinen informaatio. Tuloksena paperipohjien värikontrasti ei vastaa todellisuutta vaikkakin kuvien keskiarvovärillisyyys on lähellä orginaalien värillisyyttä. Värikontrastin merkitys kasvaa paperin pintarankenteen vaihtelujen kasvaessa (kierrätyspaperit ja sanomalehtipaperit).



Kuva 60. Digitoitujen paperipohjien värillisyyshinforaation säätöproseduuri.

Digitaalisessa paperipohjien värinsäädössä paperiorginaalista mitattujen CIE Lab väri-
lisyyden perusteella generoitiin väripohja. Tämä väripohja sisältää verratuna paperiorgi-
naaliin vain paperiorginaalin värillisyydininformaation. Pinnasta digitoitu mustavalkoku-
vaus, joka sisältää pinnan rakennekuvauksen kerrottiin väripohjan kanssa. Tuloksena oli
digitaalinen, värillinen paperipohja, jonka värillisyyden hienosäädettiin spektoradiometrin
avulla vastaamaan paperiorginaalin värillisyyttä. Mulkavalkoisessa digitoinnissa ko-
keiltiin suodinerottelua Wrattenin suotimilla 25(red), 58(green) ja 47B(blue). Mutta
koska filtit vähensivät CCD-kennoon saapuvan valon intensiteettiä niin radikaalisti,
järjestelystä luovuttiin. Taulukossa 23 esitettynä on digitaalisen paperin ja paperipohjan
väliset värierot, generoidun väripinnan ja paperipohjanvälinen väliset värierot.

Taulukko 23. Orginaalipaperien/digitoitujen paperien ja orginaalipaperien/generoitujen paperien
välinen värillisyyden ero. Negatiivinen arvo kuvaa sitä, kuinka paljon digitoinnin a^* tai b^* arvot ovat
olleet pienempiä kuin paperiorginaalin a^* tai b^* -pätee positiiviselle visa versa.

	digitoitu paperi			generoitupaperi	
	da^*	db^*		da^*	db^*
1= MA	-1,2	0,75		-0,2	0,1
2=MGloss	-0,9	-1		0,9	-0,6
3=GAmatt	-1,4	0,2		0,4	0
4=APCO	-0,9	0,8		0,3	-0,5
5=GA	0,3	-0,9		0	-0,3
6=GO	-1,3	0,9		-0,1	0,2
7=Plux	-0,8	-0,8		-1,3	0,9
8=GAsilk	-0,3	-0,3		0,5	-0,1
9=QMS	-0,4	-1,3		0,1	0
10=Muhl	-2,3	0,9		-0,2	-0,1
11= Kajaani	-0,8	0,7		0	-1,2
12=DCsilk	-0,7	-0,1		-0,2	0,2
13=Xer	0,4	-0,5		-0,1	-0,1
14=XerCK	-1,3	-0,7		-1,1	0

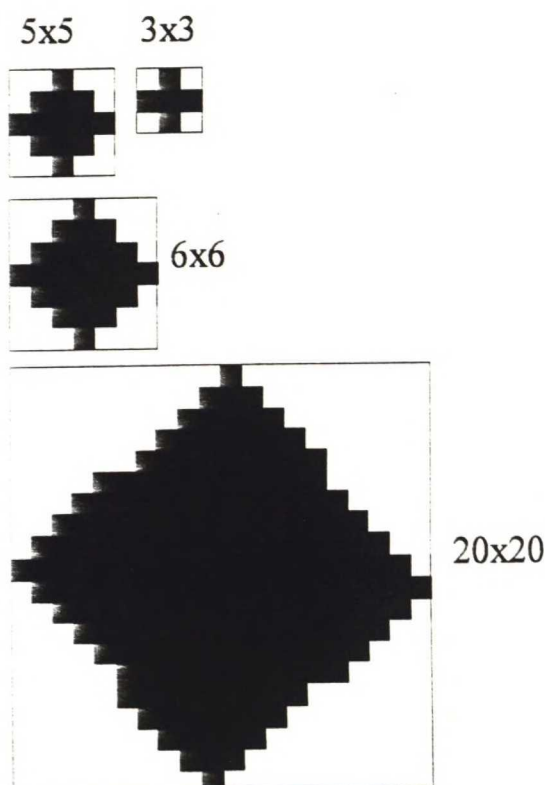
13.6 Ideaalirastereiden luonti

Diplomityössä rakennettiin digitaalisia ideaalirastereita, joiden avulla pyrittiin simuloi-
maan paperipohjan vaikutusta rasterirakenteen havainnoitiin ja toistoon
(pisteenleviäminen). Ideaalisella rasterilla tarkoitetaan tässä rasterirakennetta, joka muo-
doltaan vastaa mahdollisimman hyvin konventionaalista rasteria (pyöreä, elliptinen, ti-
mantti, neliö). Visualisoinnin taustana on ajatus että, katsomalla näyttöä kolmen metrin
päästä näytön yksi pikseli vastaa resoluutioltaan ~ 1000 dpi:tä eli pienin yksityiskohta
noin 0,026 mm. Näytölle luotiin ideaalirasterit kokoon (512 * 1024 pikseliä) seuraavin
linjatiheyksin (taulukko 24).

Taulukko 24. Rasterimatriisin koon vaikutus sävyntoistoon ja saavutettavaan linjatiheyteen.

mm*mm	Rasterimatriisin koko		Harmaasävyt	
	pikseliä	l/cm (3 m:stä)	(hajarasteri)	neliö
0,52*0,52	4 (2x2)	136	5	3
0,78*0,78	9 (3x3)	91	10	4
1,04*1,04	16 (4x4)	68	17	5
1,3*1,3	25 (5x5)	54	26	6
1,56*1,56	36 (6x6)	45	37	7
1,82*1,82	49 (7x7)	39	50	8
2,08*2,08	64 (8x8)	34	65	9
2,34*2,34	81 (9x9)	30	82	10
5,2*5,2	400 (20x20)	13	401	21

Ideaalirasteripisteen rakenne on riippuvainen siitä, kuinka monesta pikselistä rasterimatriisi koostuu (kuva 61):



Kuva 61. Rasteripisterakenteen riippuvuus kuvaelementtien määrästä rasterimatriisissa. Kuvan suurimmalla matriisilla voidaan luoda useampi sävy ja rasteripisteen muoto on ideaalisempi verrattuna pienempiin rasterimatriiseihin.

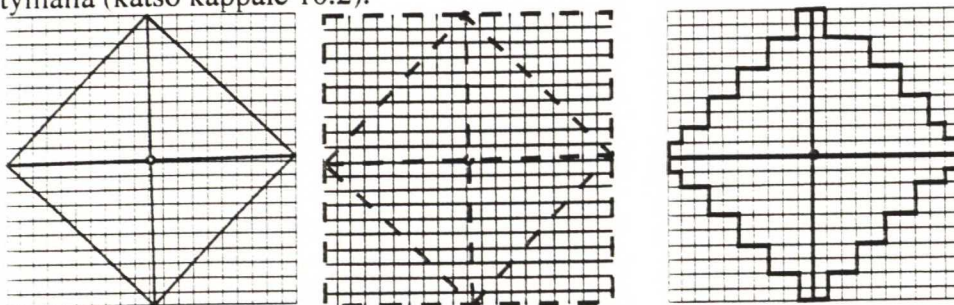
Näytön pikselikoko asettaa suuria rajoitteita näytöllä generoitaville ideaalisille rasteripisteille. Yhden pikselin koko näytöllä on 0,26 mm. Näytön pienimmän toistettavan yksityiskohdan ollessa ideaalisimmillaan 0,026 mm 3 metristä, rajoittuu käytettävän rasterimatriisin koko toistettavien harmaasävyjen kustannuksella. Haluttaessa offset-painatuksen tasoinen ideaalirasteripiste näytölle on rasterimatriisin rakentamiseen tarvit-

tavien pikselien määrä vain 25 kpl. Jos rasterirakenne halutaan muuttaa ympyräksi tai ellipsoidiksi tulee rasterimatriisiin ottaa lisää elementtejä pisteentoiston saavuttamiseksi rasteritiheyden laskun kustannuksella. Esimerkiksi tulostusresoluutio 1000 pikseliä/cm mahdollistaa 256 harmaasävyyn toiston. Tällä resoluutiolla rasterimatriisi on kokoa 20x20 pikseliä, jolloin pikselin koko on 0,01 mm. Tämä resoluutio mahdollistaa myös pisteenmuodostuksen optimoinnin. Myös CRT-visualisoinnissa rasterimatriisikoko 20 x 20 on minimikoko, jolla voidaan generoida kaikki ideaalirasterimuodot (neliö, timantti, elliptinen, pyöreä) ilman suuria rakenteen vääristymiä. Jos rasteripainatusta halutaan visualisoida diplomityössä käytetyllä näytöllä ilman 1:1 resoluutiovaatimusta, voidaan ideaalinen rasterimatriisi rakentaa hyvällä rakenteentoistolla matriisikokoon 20 x 20. Kuvassa 62 on 22x22 pistematriisilla rakennettuja pyöreitä rasteripisteitä 1:1 näyttökoossa.



Kuva 62. Näytölle luotu pyöreärasterirakenne 1:1 koossa.

Ideaalinen värirasterointi näytöllä on ongelmallista, koska eri osavärirasterien kulmat eroavat toisistaan. Jos rasterimatriisin koko on pieni, rasterirakenne hajoaa jos rasterikulma $\angle 0^\circ$ tai 45° tai 90° . Tämä johtuu näytön alhaisesta resoluutiosta verrattuna esim. offset-painatukseen ja siitä, että näytön pikselit eivät rotatoidu pikselin keskipisteen suhteen (63). Ratkaisuna voisi olla Flamenco-rasterointi, jossa kaikilla osaväreillä on sama rasterikulma. Vakiollinen rasterikulma on kompensoitu rasteripisteiden paikansiirtymällä (katso kappale 10.2).



Kuva 63. Vasemmalla konventionaalisen rasteripisteen ääriiviivä, oikealla digitaalisen rasteripisteen portaallinen ääriiviiva. Digitaalisen rasteripisteen kynnyksellisyys on suhteessa käytettävään rasterikulmaan.

13.7 Rasterirakenteen ja paperin yhteisvaikutuksen visualisointi

Rasterirakenteen ja paperin yhteisvaikutuksen visualisointi voidaan tehdä kuvankäsittelyn keinoin suodatusoperaatioilla. Suodinoperaatioiden lisäksi pisteenleviämistä voidaan simuloida ohjelmallisesti. Ohjelmapohjainen pisteenleviämisen generointi mahdollistaa painoväri/paperi vuorovaikutussuhteen huomioimisen, esim. offset-väri/LWC-paperi.

Ohjelmapohjaista rasterirakenteen ja paperipohjan vuorovaikutuksen simulointia ei ole käsitelty tässä työssä.

Digitoidusta paperipohjasta ja valitusta rasterirakenteesta voidaan pisteoperaatioiden avulla muodostaa output-kuva. Pisteoperaatio tuottaa jokaisesta input-kuvan alkion vastaavan output-kuvan alkion annetun laskentaohjeen mukaisesti, esim. summa, tulo, jakolasku ja vähennys. Tällöin saadaan kuvaus, jossa digitoidun paperipohjan päällä on rasterikenttä. Operaatiota voidaan käyttää visualisoimaan paperipohjan vaikutusta rasterikentän värillisyyden muodostukseen ilman pisteenleviämistä. Tässä työssä käytetyt kuvankäsittelyohjelmien PhotoStyler 1.1 ja PhotoShop 2.5 algebralliset laskentaoperaatiot ("Compute:") eivät tue toimintoa, jossa paperipohja vaikuttaa rasterirakenteen muodostumiseen (pisteenleviäminen). Pisteenleviämistä voidaan aproksimoida ympäristöoperaatioiden avulla: suodattamalla rasterirakenne+paperipohja kuvaus. Filtterinä voidaan käyttää esim. paikallista keskiarvosuodatusta ("moving average"), "Blur"-suodatusta (kuva 64).

Keskiarvofiltteri

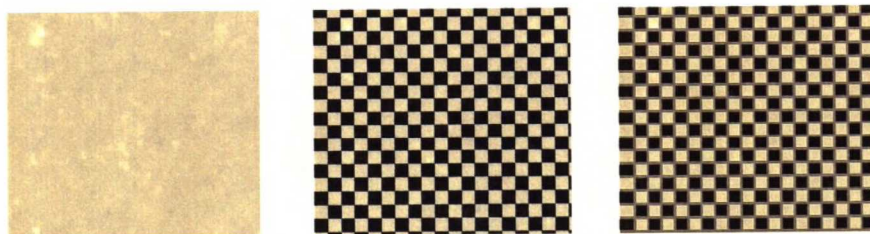
$$\begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{array} \quad \times 1/9$$

"Blur"-filtteri

$$\begin{array}{ccc} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{array} \quad \times 1/24$$

Kuva 64. Rasterirakenteen kohinan generointiin käytetyt 3x3 filtterit.

Keskiarvosuodatus on ympäristöoperaatio, joka laskee pikselille uuden arvon naapuripikselien sävyarvojen keskiarvon perusteella. Pikselin sävyarvoon voidaan vaikuttaa kasvattamalla suodatusmatriisinkokoa, esim. PhotStyler 1.1:ssä voidaan laskea keskiarvosuodatus seuraavilla matriisikokoina: 2 x 2, 3 x 3, 4 x 4, 5 x 5, 6 x 6, 7 x 7 ja 8 x 8 pikseliä. Kuvassa 65 on tulostettu digitoitu paperiorginaali no: 10, 10+50 % rasterikenttä ja 10+50 % rasterikenttäkeskiarvosuodatettuna 2 x 2 filtterikoolla.



$$\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \quad \times 1/4$$

Kuva 65. Keskiarvosuodatuksen vaikutus rasterirakenteen toistoon. Kuvat ovat 95x83 pikselin osaleikkaus digitoitusta paperipohjasta (suurennussuhde 10:1, paperi digitoitu 0°/25°-geometrialla). Tulostus laskee kuvan resoluutiota ja kiiltoefektiä.

13.8 Paperien ja digitointien parivertailut

Paperiorginaalien laatuominaisuuksien subjektiiviseen kartoitukseen käytettiin parivertailumenetelmää. Kartoituksen tarkoituksena on saada vertailuaineistoa, johon näytöllä suoritettavassa parivertailussa saatua dataa verrataan visualisointiaseman toimivuuden todentamiseksi. Orginaalipaperien välisiä parivertailuja tehtiin seuraavasti:

- 1) Kysymyksenasettelulla " Samalainen/Erilainen " neljälletoista eri paperille.
 - 2) Kysymyksenasettelulla " Samalainen/Erilainen " yhdelletoista eri paperille
- Testijoukosta 1) vähennettiin kolme paperia (Kajaani, Muhlenbach ja XeroxCK).
- 3) Kysymyksenasettelulla " Kumpi paperi on kiiltävämpi ? " neljälletoista eri paperille.

Kaikissa vertailutilanteissa koe suoritettiin valaisu- ja heijastuskontrolloidussa tilassa. Parivertailut suoritettiin huoneessa, jossa oli standardi valonlähde. Valonlähteenä käytettiin diffuusia loistelamppuvalonlähdettä D65 (5 kpl). Huoneenvalaistustaso säädettiin vastaamaan digitoinnissa käytettyä valaistustasoa. Näytepöydän väri valittiin keskiharmaaksi (Canson), joka vastaa kromaattisuudeltaan näyttöparivertailujen taustaharmaata. Parivertailussa koehenkilöiden katselukulma oli paperipinnan normaalin suuntainen valaisun osuessa paperipintaan $\sim 30^\circ$ kulmassa.

Parivertailutilanteessa 1) 10 koehenkilöä ja 2) 5 koehenkilöä arvosteli kulloisen paperiparin erilaisuutta/samanlaisuutta portaattomalla mitta-asteikolla (kuva 16 kappale 6.2.1). Vertailussa 3) 8 koehenkilöä arvosteli paperiparien kiiltoa kysymyksenasettelulla "Kumpi paperi on kiiltävämpi?". Vertailujen 1) ja 2) tulokset analysoitiin MDS-analyysillä (kappale 6.2.1). Vertailutilanteessa 3) koehenkilöt pisteyttivät paperit havaitun kiillon perusteella.

Digitointien parivertailut suoritettiin pimeässä huoneessa, jonka valonlähteenä oli CRT-näyttö (kalibroitu D65 värillisyystillään). Parivertailuja tehtiin kolmelta eri katseluetaäisyydeltä (taulukko 25).

Taulukko 25. Digitoitujen paperipohjien testitilanne vakiot.

	Katseluetaäisyys	resoluutio	koehenk.	digitointien	kulma
		näytöllä	lkm	lkm	
Testi 3	3 m	977 dpi	10	14	0/30
Testi 4	3m	977 dpi	5	11	0/25
Testi 5	2 m	655 dpi	5	11	0/25
Testi 6	0,5 m	163 dpi	8	14	0/25

Koehenkilöt arvostelivat testiparien erilaisuutta/samankaltaisuutta portaattomalla lineaariasteikolla testeissä 4 ja 5. Testi 6 suoritettiin kysymyksenasettelulla " Kumpi näytteistä on kiiltävämpi ? " 2-0, 0-2 ja 1-1 pisteytyksellä. Kaikissa näyttövertailutilanteissa vertailuparit esitettiin vierekkäin satunnaisjärjestyksessä näytöllä 512*1024 pikselin kokoisena/näyte.

13.8.1 Paperiorginaalien parivertailujen MDS-analyysin tulokset

Paperiorginaalien parivertailuaineistolle testeissä 1) ja 2) suoritettiin MDS-analyysi 1-, 2-, 3- ja 4-dimensiossa Multiscl-ohjelmistolla siten, että tuloksien analysoinnissa otettiin huomioon kohenkilön subjektiiviset painotukset (metric=diagonal). Ohjelma tulostaa MDS-mallin annetussa dimensiossa. MDS-mallin dimensioiden lukumäärä on verrannollinen parivertailussa käytettyyn päätöskriteereiden määrään. Dimensioiden rajauksessa käytettiin log-likelihood testausta (taulukko 26).

Taulukko 26. Paperiorginaalien MDS-analyysien dimensioiden log-likelihood testaus 95 %:n luottamusvälillä.

Testi 1

D	Log-likelihood	vapausasteet	testisuureen arvo	χ^2	$\chi^2 < H_0$
0	-1494.00	(10-0)=10	-	-	-
1	-1109.07	(10-1)=9	769.86	16,92	TRUE
2	-998.89	(10-2)=8	220.36	15,51	TRUE
3	-924.48	(10-3)=7	148.82	14,07	TRUE
4	-889.38	(10-4)=6	69.72	12,59	TRUE

Testi 2

D	Log-likelihood	vapausasteet	testisuureen arvo	χ^2	$\chi^2 < H_0$
0	-330.59	(5-0)=5	-	-	-
1	-250.50	(5-1)=4	160,18	9,49	TRUE
2	-207.70	(5-2)=3	85,6	7,82	TRUE
3	-168.56	(5-3)=2	78,28	5,99	TRUE
4	-147.60	(5-4)=1	41,92	3,84	TRUE

Log-likelihood testaus tuki testitilanteille 1) ja 2) > 4 dimensiota, mutta korrelaatio ja regressioanalyysit dimensioiden ja papereista mitattujen laatusuureiden välillä laskivat dimensioiden lukumäärän 2:een . Yleensä koehenkilöt käyttivät arvioinneissaan kahta tai kolmea dimensiota, mutta harvemmin neljää. Testitilanteiden 1 ja 2 regressioanalyysin tulokset on esitettyä liitteessä 12. Parivertailuissa 1 ja 2 saaduille MDS-mallin dimensioille laskettiin korrelaatiot (taulukko 27)

Taulukko 27. Testin 1) paperien MDS-analyysissä saatujen dimensioiden 1, 2, 3 ja papereiden kiiltolaatumittojen (75°/75° ja 45°/45°), karheuden tunnusluvun Ra:n ja L*a*b*-värillisyyden väliset korrelaatiot.

3dpd	1d	2d	3d	75°/75°	1d	2d	3d	45°/45°	
1d	1,00				1d	1,00			
2d	-0,08	1,00			2d	-0,08	1,00		
3d	-0,11	0,01	1,00		3d	-0,11	0,01	1,00	
75°/75°	-0,32	-0,23	-0,63	1,00	45°/45°	-0,16	-0,03	-0,84	1,00

	1d	2d	3d	Ra	1d	2d	3d	L*	a*	b*	
1d	1,00				1d	1,00					
2d	-0,08	1,00			2d	-0,08	1,00				
3d	-0,11	0,01	1,00		3d	-0,11	0,01	1,00			
Ra	0,48	0,29	0,31	1,00	L*	-0,74	-0,02	-0,03	1,00		
					a*	-0,41	0,23	0,16	0,33	1,00	
					b*	0,80	-0,12	-0,16	-0,79	-0,55	1,00

Testitilanteessa 1 orginaalipapereiden kiillolle 75°/75° - geometriassa ja dimensiolla 3 saatiin kertoimella -0,63 korrelaatio. Samoin kiillolle 45°/45°-geometriassa ja dimensiolla 3 saatiin negatiivinen korrelaatio kertoimella -0,84. Paperien L* arvolla ja dimensiolla 1 on kertoimella -0,74 korrelaatio, myös b* ja dimensiolla 1 on kertoimella 0,80 korrelaatio. Dimensioiden 1,2 ja 3 ja karheussuureen Ra välille ei löytynyt merkittävää korrelaatiota. Dimensiolle 2 ei löydetty korrelaatiota kiiltoon, karheuteen, ja värillisyyteen nähden. Korrelaatio analyysin perusteella dimensio 3 ja kiillon välillä on negatiivinen korrelaatio eli korkeaa paperin kiiltoarvoa vastaa matala dimensioarvo. On todennäköistä, että koehenkilöt ovat arvioineet testissä 1 paperien erilaisuutta vain sävyn perusteella.

Paperinäytteet Xrec (kierrätyspaperi), Mrec(kierrätyspaperi) ja Kajaani(sanomalehti) poistettiin testitilanteesta 2, jotta saataisiin aikaan suurempi erottelu pääjoukkoon. Kyseiset paperit ovat sävyltää muita tummempia, karheampia ja roskaisempia. Testitilanteen 2 korrelaatioanalyysin tulokset on esitetty taulukossa 28.

Taulukko 28. Testin 2) paperien MDS-analyysiin dimensioiden 1, 2, 3 ja kiiltolaatumittojen ($75^\circ/0^\circ$ ja $45^\circ/45^\circ$), karheusluokkaan Ra:n ja $L^*a^*b^*$ -värillisyydenväliset korrelaatiot.

<i>3dpd</i>	<i>1d</i>	<i>2d</i>	<i>3d</i>	<i>75°/75°</i>	<i>1d</i>	<i>2d</i>	<i>3d</i>	<i>45°/45°</i>	
<i>1d</i>	1,00				<i>1d</i>	1,00			
<i>2d</i>	0,18	1,00			<i>2d</i>	0,18	1,00		
<i>3d</i>	-0,25	-0,21	1,00		<i>3d</i>	-0,25	-0,21	1,00	
<i>75°/75°</i>	0,97	0,14	-0,21	1,00	<i>45°/45°</i>	0,96	0,26	-0,30	1,00

	<i>1d</i>	<i>2d</i>	<i>3d</i>	<i>Ra</i>		<i>1d</i>	<i>2d</i>	<i>3d</i>	<i>L*</i>	<i>a*</i>	<i>b*</i>
<i>1d</i>	1,00				<i>1d</i>	1,00					
<i>2d</i>	0,18	1,00			<i>2d</i>	0,18	1,00				
<i>3d</i>	-0,25	-0,21	1,00		<i>3d</i>	-0,25	-0,21	1,00			
<i>Ra</i>	-0,77	-0,07	0,21	1,00	<i>L*</i>	0,60	0,19	-0,04	1,00		
					<i>a*</i>	-0,25	-0,50	0,43	0,11	1,00	
					<i>b*</i>	0,44	0,80	-0,44	0,40	-0,65	1,00

Vähentämällä paperimäärä 11 ja käyttämällä 5 koehenkilöä löytyi dimensiolla 1 ja paperien kiillolle korrelaatio kertoimella 0,96 kiiltogeometriassa $45^\circ/45^\circ$ ja 0,97 kiiltogeometrialla $75^\circ/75^\circ$. Karheuden ja 1 dimension välillä on negatiivinen korrelaatio kertoimella -0,70. Dimension 2 ja b^* välillä on korrelaatio kertoimella 0,80. Dimensiolle 3 ei löytynyt korrelaatiota mitattuihin laatulukuihin verrattuna. Testitilanteen 2) dimensiokoordinaateista 1 tunnistettiin kiilloksi ja 2 sävyksi. Karheuden negatiivinen korrelaatio dimension 1 välillä tukee teoriaa, mikrokärheuden kasvaessa kiilto laskee.

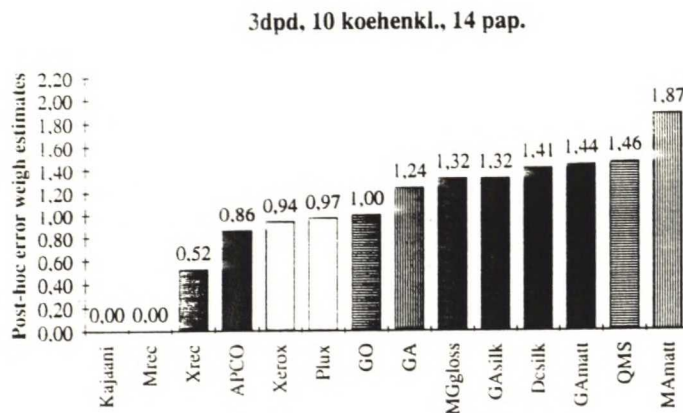
MDS-analyysin avulla saatiin annetulla dimensiomäärällä malli, johon on plotattu tutkitut näytteet. Näytepisteiden välinen etäisyys vastaa havaittua näytteiden välistä eroa. Tutkitut näytteen sijoittuivat mittattujen ominaisuuksien mukaisesti, näytteistä ennakolta selvästi muita erilaiset paperilaadut: Muhlenbach (Mrec), Kajaani ja Xerox CK (Xrec) erottuvat ominaisuuksien mukaisesti (sävy) pääjoukosta testitilanteessa 1), joka koostuu pääosiltaan valkaistusta, päällystetyistä papereista.

Koehenkilöiden eri dimensioiden antamat painokertoimet tukevat kolmea dimensiota (taulukko 29), joista tunnistettiin vain yksi dimensio testitilanteessa 1) ja kaksi dimensiota testitilanteessa 2). Painokerroin kuvaa koehenkilön dimensiolla antamaa painoarvoa tehtäessä päätöstä paperien erilaisuudesta/samanlaisuudesta. Koetilanteessa 1) 50 % koehenkilöistä painotti dimensiota 1, 50 % dimensiota 2 ja 50 % dimensiota 3. Koetilanteessa 2) painotukset muuttuivat siten, että 33 % koehenkilöistä painotti dimensiota 1 ja 33 % painotti dimensiota 2 ja 33 % dimensiota 3.

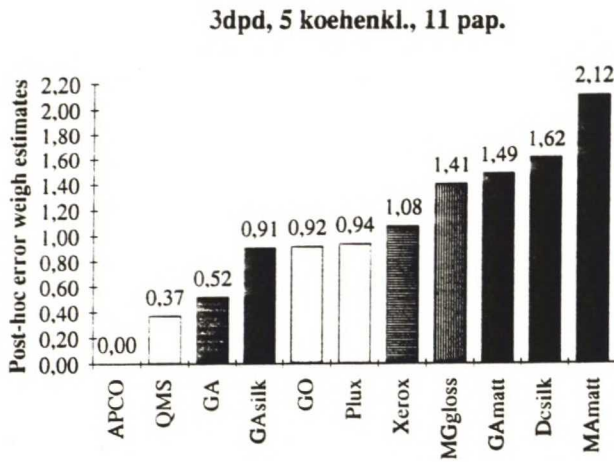
Taulukko 29. Kohekilöiden painotukset eri dimensioilla.

3dpd	1d	2d	3d	dimensioiden lkm/koehenkl.
1 JuKi	1,010	0,007	1,407	2*
2 MiLi	1,512	0,138	0,834	1*
3 TaPe	0,021	0,069	1,731	1
4 MiNo	0,327	1,261	1,142	2
5 TaMu	0,755	1,111	1,093	2
6 JuMaLö	1,574	0,672	0,265	1*
7 JuGKo	0,870	1,498	0,023	1*
8 HeLe	0,071	1,714	0,240	1
9 ArHu	1,289	1,148	0,140	2
10 TiHa	1,057	0,457	1,294	2*
	5	5	5	
3dpd				
1 JuGKo	0,006	1,732	0,021	1*
2 JuMaLö	1,443	0,117	0,950	1*
3 TiHa	0,082	1,362	1,067	2*
4 JuKi	1,686	0,373	0,134	1*(-1)
5 MiLi	0,243	0,023	1,715	1*
	2	2	2	

Näytteisiin kohdistuvaa koehenkilöiden päätöksen suhteellista muutosta kuvaa Post-hoc -estimaatti./44/ Estimaatin alaraja on 0 ja keskiarvo 1:ssä. Kuvissa 66 ja 67 on tulostetuna testilanteiden 1) ja 2) näytteiden saamat Post-hoc keskivirhe-estimaatit:



Kuva 66 .Testin 1) paperien PostHoc-estimaatit



Kuva 67. Testin 2) paperien PostHoc-estimaatit.

Koetilanteessa 1) Kajaanin ja Mrec Post-hoc arvo on nolla, samoin näytteen Xrec, APCO arvot ovat lähellä nollaa. Nämä näytteet ovat sävyltään selvästi pääjoukosta erottuvia, joten näytteiden erottelu yli koehenkilöiden on ollut tasaisempaa. Testitilanteessa 2) Xrec:n, Mrec:n ja Kajaanin puuttuessa helpommin eroteltavat näytteet ovat olleet APCO, QMS ja GA. Näistä APCO on kiiltävä ja sävyltään kellertävä, QMS matta ja sinertävä ja GA kiiltävä.

Multisci-ohjelmisto tulostaa näytteisiin liittyvien laatulukujen lisäksi (Post-hoc virhe-estimaatti) tunnuslukuja, jotka kuvaavat koehenkilöiden hyvyttä. Tällainen laatulukuja on esim. koehenkilöiden keskivirhe (Standard error) ja Quantile error. Keskivirhe ilmaisee kuinka hyvin tietyn koehenkilön arvioinnit vastaavat koko ryhmän arviointeja. Suureen keskivirheeseen voi olla syynä se, että koehenkilö on erimieltä kuin muut tai koehenkilö on epäjohtonmukainen. Quantile error-kaavion avulla saadaan selville johtuuko koehenkilön suuri keskivirhe erimielisyydestä tai epäjohtonmukaisuudesta. Taulukkoon 30 on listattu koehenkilöiden keskivirheet testitilanteessa 1) ja 2):

Taulukko 30. Koehenkilöiden keskivirheet eri testitilanteissa.

Testi 1	Standard error	Multiple correlation
1 JuKi	0,86	0,82
2 MiLi	0,68	0,86
3 TaPe	0,42	0,61
4 MiNo	0,52	0,75
5 TaMu	0,71	0,75
6 JuMaLö	0,69	0,83
7 JuGKo	0,59	0,71
8 HeLe	0,47	0,58
9 ArHu	0,96	0,71
10 TiHa	0,94	0,74

Testi 2	Standard error	Multiple correlation
1 JuGKo	1,10	0,73
2 JuMaLö	0,31	0,40
3 TiHa	0,61	0,70
4 JuKi	0,47	0,48
5 MiLi	0,39	0,21

Quantile-error-tulosten perusteella koehenkilöpopäulaatiossa ei esiintynyt epäjohdonmukaisuutta.

13.8.2 Digitoitujen paperipohjien MDS-analyysin tulokset

Testeistä 3), 4) ja 5) saadulle aineistolle suoritettiin MDS-analyysi, kuten orginaalipapereillekin. Tulokset tukivat testitilanteelle 3) kahta päätöksentekodimensiota, jotka tulkittiin vaaleudeksi ja sävyksi. Orginaali papereiden ja digitointien arvioinneissa koehenkilöt käyttivät molemmissa parivertailutapaksissa MDS-analyysin perusteella vaaleusdimensiota. Sen sijaan toinen dimensio on eri: paperilla kiilto ja digitoinneilla vaaleus. Syyn toisen dimension erilaisuuteen on se, että näytöllä kiiltokomponentin simuloiminen on vaikeaa/epäonnistunut, joten koehenkilön on tehtävä samanlaisuus/erilaisuus päätös muun kriteerin perusteella, tässä vaaleus. Tekijä, joka vaikeuttaa näytöllä visualisoitavan paperin kiiltohavaintoa, jos luminanssi kontrasti on alhainen, on näyttökiillon "stabiilisuus". Näytöllä visualisoitava paperin luminanssigradiendi ei muutu muutettaessa katselukulmaa ympäristön valaistusolosuhteitten olessa vakiolliset (näytön pintaheijastus = 0). Toinen huomioitava tekijä on se, että testien perusteella näytön luminanssi maksimi 104 Cd/m² ei ehkä 3-2 metristä tarkasteltuna anna riittävää dynamiikkaa luomaa subjektiivisesti havaittava kiiltoefekti.

Myös digitoiduilla papereilla Log-likelihood testus ei kyennyt identifioimaan sitä dimensiomäärää, jota koehenkilöt käyttivät parivertailutilanteessa (taulukko 31).

Taulukko 31. Digitointujen paperien Log-likelihood testaus.

Testi 3					
D	Log-likelihood	vapausasteet	testisuureen arvo	χ^2	$\chi^2 < H_0$
0	-1470,13	(10-0)=10	-		
2	-819,98	(10-2)=8	1300,30	15,51	TRUE
3	-756,08	(10-3)=7	127,80	14,07	TRUE
4	-703,11	(10-4)=6	105,94	12,59	TRUE

Testi 4

D	Log-likelihood	vapausasteet	testisuureen arvo	χ^2	$\chi^2 < H_0$
0	-337,71	(5-0)=5	-		
2	-192,36	(5-2)=3	290,70	7,82	TRUE
3	-166,56	(5-3)=2	51,60	5,99	TRUE
4	-144,28	(5-4)=1	44,56	3,84	TRUE

Testi 5

D	Log-likelihood	vapausasteet	testisuureen arvo	χ^2	$\chi^2 < H_0$
0	-320,69	(5-0)=5	-		
2	-149,42	(5-2)=3	342,54	7,82	TRUE
3	-104,62	(5-3)=2	89,60	5,99	TRUE
4	-76,68	(5-4)=1	55,88	3,84	TRUE

Testitilanteista 3), 4) ja 5) saaduille dimensioille laskettiin korrelaatiot paperiorginaaleista mitattuun kiiltoon, karheuden tunnuslukuun ja näytöltä mitattuihin digitointien Lab-värikkisyyteen ja harmaasävyjen keskiarvoon (taulukot 32-34) . Korreloiville dimensiolle/laatuluville suoritettiin lisäksi regressioanalyysi (liite 13)

Taulukko 32. Testin 3) dimensioiden korrelaatiot laatulukuihin.

3ddd/30°				1d 2d 3d 75°/75°				1d 2d 3d 45°/45°							
1d				1,00				1d				1,00			
2d				-0.32 1,00				2d				-0.32 1,00			
3d				-0.17 0.20 1,00				3d				-0.17 0.20 1,00			
75°/75°				0.44 0.30 0.12 1,00				45°/45°				0.29 0.28 0.21 1,00			

1d 2d 3d Ra				1d 2d 3d gray											
1d				1,00				1d				1,00			
2d				-0.32 1,00				2d				-0.32 1,00			
3d				-0.17 0.20 1,00				3d				-0.17 0.20 1,00			
Ra				-0.60 -0.06 0.01 1,00				gray				0.89 -0.09 -0.31 1,00			

1d 2d 3d L* a* b*							
1d				1,00			
2d				-0.32 1,00			
3d				-0.17 0.20 1,00			
L*				0.89 -0.14 -0.32 1,00			
a*				0.56 -0.64 -0.37 0.47 1,00			
b*				-0.80 0.73 0.18 -0.63 -0.81 1,00			

Testitilanteen 3) dimensioille löydettiin seuraavat korrelaatiot: kiillon ja dimensioiden välillä ei löydetty merkittävää korrelaatiota, karheuden ja dimension 1 välille löydettiin negatiivinen korrelaatio kertoimella 0,60, samoin dimensiolle 1 löydettiin positiivinen korrelaatio kuvan keskimääräiseen harmaasävyarvoon (kerroin 0,89) ja L^* :een (kerroin 0,89). Dimensio 1 tulkitaan vaaleudeksi. Dimension 2 ja b^* :n välillä on korrelaatio kertoimella 0,73. Dimensio 2 tulkitaan sävyksi. Dimensiolle 3 ja mitattujen laatulukujen välille ei löydetty korrelaatiota.

Testeissä 4) ja 5) koehenkilöiden määrä oli 5 kpl, näytteitä 11 kpl ja koehenkilön etäisyys näytöstä 3m (testi 4) ja 2 m (testi 5).

Taulukko 33. Testin 4) dimensioiden korrelaatiot laatulukuihin.

3ddd/25°	1d	2d	3d	75°/75°		1d	2d	3d	45°/45°	
1d	1,00					1d	1,00			
2d	0,18	1,00				2d	0,18	1,00		
3d	0,74	0,25	1,00			3d	0,74	0,25	1,00	
75°/75°	-0,37	-0,55	-0,46	1,00		45°/45°	-0,60	-0,44	-0,49	1,00

	1d	2d	3d	Ra		1d	2d	3d	gray	
1d	1,00					1d	1,00			
2d	0,18	1,00				2d	0,18	1,00		
3d	0,74	0,25	1,00			3d	0,74	0,25	1,00	
Ra	0,29	0,48	0,49	1,00		gray	-0,16	-0,65	-0,07	1,00

	1d	2d	3d	L*	a*	b*
1d	1,00					
2d	0,18	1,00				
3d	0,74	0,25	1,00			
L*	-0,38	-0,69	-0,13	1,00		
a*	0,32	0,57	0,50	-0,34	1,00	
b*	-0,55	-0,65	-0,58	0,33	-0,82	1,00

Testin 4) (11 näytettä, 5 koehenkilöä, havainnointi kolmesta metristä) dimensioiden ja laatulukujen välille löydettiin seuraavat korrelaatiot: dimensiolle 1 negatiivinen korrelaatio kiiltoon 45°/45°-geometrialla kertoimella -0,60, samoin a^* :een kertoimella -0,55. Dimensiolle 2 negatiivinen korrelaatio kuvan keskimääräiseen harmaasävyyteen kertoimella -0,65 ja L^* :een kertoimella -0,69, b^* :een kertoimella -0,55 ja a^* :een positiivisella kertoimella 0,57. Dimensiolla 3 on positiivinen korrelaatio a^* kertoimella 0,50 ja b^* negatiivinen korrelaatio kertoimella -0,58. Ra:n ja dimensioiden välillä ei löydetty merkittävää korrelaatiota. Testitilanteen 4 ja laatusuureiden välisiä korrelaatioita ei voida pitää merkittävänä.

Taulukko 34. Testin 5) dimensioiden korrelaatiot laatulukuihin.

3ddd/25°	1d	2d	3d	75°/75°	1d	2d	3d	45°/45°	
1d	1,00				1d	1,00			
2d	-0,20	1,00			2d	-0,20	1,00		
3d	-0,68	-0,23	1,00		3d	-0,68	-0,23	1,00	
75°/75°	-0,48	0,00	0,46	1,00	45°/45°	-0,57	0,24	0,42	1,00

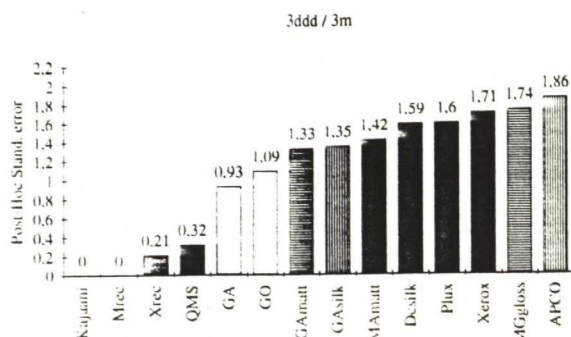
	1d	2d	3d	Ra
1d	1,00			
2d	-0,20	1,00		
3d	-0,68	-0,23	1,00	
Ra	0,36	0,03	-0,39	1,00

	1d	2d	3d	gray
1d	1,00			
2d	-0,20	1,00		
3d	-0,68	-0,23	1,00	
gray	-0,56	-0,32	0,65	1,00

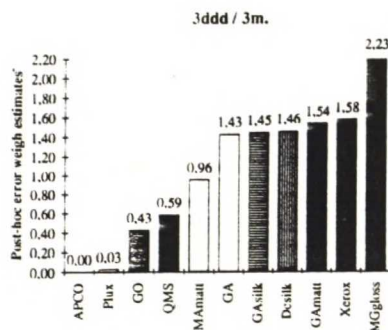
	1d	2d	3d	L*	a*	b*
1d	1,00					
2d	-0,20	1,00				
3d	-0,68	-0,23	1,00			
L*	-0,55	-0,12	0,72	1,00		
a*	0,67	-0,07	-0,65	-0,34	1,00	
b*	-0,87	0,22	0,69	0,33	-0,82	1,00

Testitilanteen 5) (11 näytettä, 5 koehenkl. ja havainnointi kahdesta metristä) L*:n ja dimension 3 välillä on korrelaatio kertoimella 0,72 samoin korrelaatio keskimääräiseen kuvan harmaasävyyn kertoimella 0,65. Sävyille a* ja dimensiolla 1 on korrelaatio kertoimella 0,67 ja b* ja dimension 1 välillä kertoimella -0,87. Dimensiolle 2 ja tunnusluku- kujen välille ei löytynyt korrelaatiota. Ainostaan kromaattisuustekijän b* ja dimensio 1 välistä korrelaatiota voidaan pitää merkittävänä.

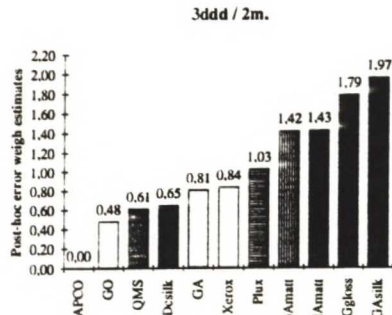
Testitilanteessa 3) digitoiduille papereille lasketut Post-hoc estimaatit vastasivat paperi- en testitilanteen 1) Post-hoc estimaatteja pääjoukon näytteiden Kajaani, Mrec, Xrec osalta (kuvat 68-70):



Kuva 68 Testitilanteen 3) Post-hoc estimaatit.



Kuva 69. Testitilanteaatit



Kuva 70. Testitilanteen 5) Post-hoc estimaatit

Testitilanteen 4) ja 2) näytteiden Post-hoc estimaatit ovat yhteneviä ainoastaan näytteen APCO , GAmatt osalta. APCO:n pieni näytekohtainen virhe johtune, näytteen erosta verttatuna muihin näytteisiin: kellertävä. Tarkastelemalla digitoitujen paperien vertailussa käytettyjä dimensioiden saamia painokertoimia, huomataan eri koehenkilöiden erilainen painotus. Suurinosa on käyttänyt vain yhtä dimensiota erottelussa: testissä 3) 8/10, testissä 4) 4/5 ja testissä 5) 3/5. Toisaalta käytetyt dimensioidet eivät ole samoja eri koehenkilöillä (taulukko 35).

Taulukko 35. Eri dimensioiden saamat painokertoimet eri koehenkilöitä

3ddd/14 dig 3m	1d	2d	3d	dimensioiden lkm/koehenkl.
1 MiNo	1,370	1,057	0,069	2
2 TiHa	0,410	1,146	1,233	2*
3 JuKi	0,496	0,476	1,590	1*
4 JuMaLö	0,639	0,064	1,609	1*
5 TaMu	0,357	1,564	0,652	1
6 ArHu	0,481	0,687	1,516	1
7 TaPe	0,270	1,663	0,401	1
8 HeLe	0,984	1,289	0,608	1
9 MiLi	1,705	0,019	0,306	1*
10 JuGKo	1,728	0,033	0,107	1*
	2	5	5	

3ddd/11 dig 3m				
1 JuGKo	0,006	1,732	0,021	1*
2 JuMaLö	1,443	0,117	0,950	1*
3 TiHa	0,082	1,362	1,067	2*
4 JuKi	1,686	0,373	0,134	1*
5 MiLi	0,243	0,023	1,715	1*
	2	2	2	

3ddd/11 dig 2m

1 JuGKo	0,796	0,673	1,383	1*
2 JuMaLö	0,268	1,711	0,004	1*
3 TiHa	0,322	1,272	1,130	2*
4 JuKi	1,139	0,048	1,304	2*(+1)
5 MiLi	1,700	0,034	0,328	1*
	2	2	3	

Koehenkilöiden keskivirheet testitilanteissa 3) ovat verraten pieniä, eikä suurempia poikkeamia ole, joten testiryhmä oli verraten yksimielinen (taulukko 36).

Taulukko 36. Koehenkilöiden keskivirhe eri testitilanteissa 3), 4) ja 5).

Testi 3	Standard	Multiple
14 dig. 3m	error	correlation
1 MiNo	0,36	0,95
2 TiHa	0,44	0,85
3 JuKi	0,46	0,81
4 JuMaLö	0,34	0,84
5 TaMu	0,97	0,63
6 ArHu	0,63	0,76
7 TaPe	0,58	0,77
8 HeLe	0,58	0,85
9 MiLi	0,69	0,81
10 JuGKo	0,67	0,84

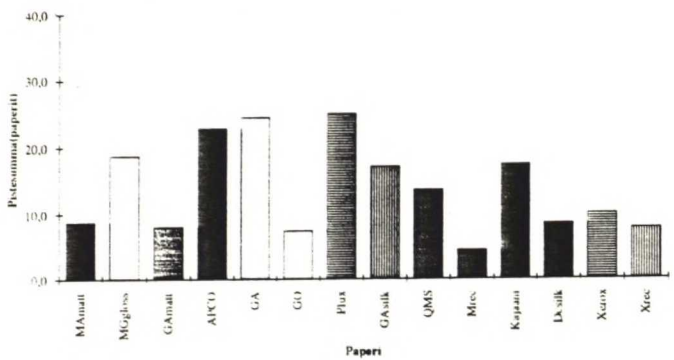
Testi 4	Standard	Multiple
11 dig. 3m	error	correlation
1 JuGKo	1,10	0,73
2 JuMaLö	0,31	0,40
3 TiHa	0,61	0,70
4 JuKi	0,47	0,48
5 MiLi	0,39	0,21

Testi 5	Standard	Multiple
11 dig. 2m	error	correlation
1 JuGKo	0,36	0,87
2 JuMaLö	0,47	0,58
3 TiHa	0,21	0,91
4 JuKi	0,44	0,82
5 MiLi	0,45	0,79

Digitoitujen parivertailujen osalta voidaan todeta, että MDS-analyysin perusteella koehenkilöiden näyttövertailussa käyttämien dimensioiden määrä on max 2 dimensiota. MDS-testauksen perusteella koehenkilöt eivät erottaneet näytöltä kiiltokomponenttia ja karheuskomponenttia. Näytöllä paperit eroteltiin lähinnä paperien vaaleuden ja kro-
maattisuuden perusteella. Kiiltokomponentin puuttumisen syynä on lähinnä näytön al-
hainen luminanssikontrasti katseluetäisyyksillä 3 ja 2 metriä.

13.8.3 Paperien ja digitoitujen paperipohjien pistesumma-analyysin tulokset

Orginaalipaperien parivertailu kysymyksen asettelulla " Kumpi näytteistä on kiiltä-
vämpi?" suoritettiin muuten samoissa olosuhteissa kuin MDS-analyysin parivertailut,
paitsi erottelumekanismien osalta. Koehenkilö pisteytti parit (2-0,0-2, 1-1) -periaatteella.
Tällöin kunkin parin voittaja saa kaksi pistettä häviäjän saadessa 0 p. Tasapelistä kum-
pikin näyte saa 1:n pisteen. Kuvassa 71 on näytekohtainen pistesummajakauma.



Kuva 71. Testipapereiden saama pistesumma- jakauma yli paperien.

Laskemalla pistesummien korrelaatio paperin kiillon laatusuureisiin saatiin paperin pis-
tesummajakaumalle ja paperin kiillolle 75°/75°-geometriassa korrelaatio kertoimella
0,80 ja paperin kiillolle 45°/45°-geometriassa korrelaatio kertoimella 0,81. Täten koe-
henkilöt pystyivät erottelemaan paperit kiillon perusteella. Vertaamalla objektiivista
kiilto- jakaumaa ja kiiltoa subjektiivisena arvosteluna on yhtäläisyys suuri selvästi kiil-
tävimmissä näytteissä Sen sijaan ero objektiiviseen kiiltoon nähden kasvaa matala
kiiltoisilla näytteillä. Subjektivisen kiillon ja objektiiviselle Ra:n välillä on negatiivinen
korrelaatio kertoimella -0,65 l. mikrokarheuden kasvaessa paperien kiilto laskee
(taulukko 37).

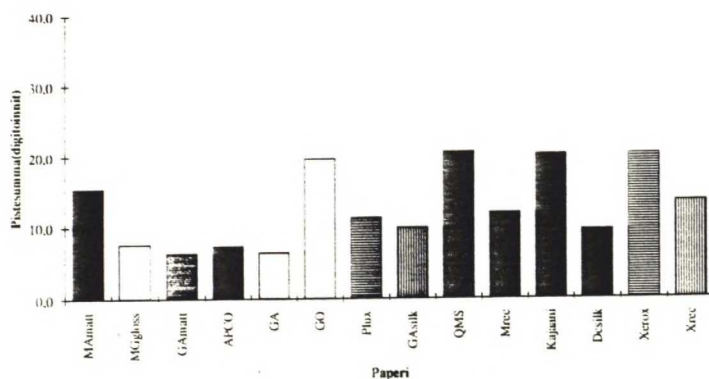
Taulukko 37. Testipapereiden pistesumman ja paperien kiillon 75°/75°-, 45°/45°-geometriassa
ja Ra-arvon väliset korrelaatiot.

	pistesumma	75°/75°
pistesumma	1,00	
75°/75°	0,80	1,00

	<i>pistesumma</i>	45/45
<u><i>pistesumma</i></u>	1,00	
<u>45/45</u>	0,81	1,00

	<i>pistesumma</i>	<i>Ra</i>
<u><i>pistesumma</i></u>	1,00	
<u><i>Ra</i></u>	-0,65	1,00

Digitointien parivertailu tehtiin 0,50 m etäsydeltä näytöstä olosuhteitten muuten vasta-
tessa MDS-analyysien parivertailutilanteita. Digitoitujen paperien saamat pistesummat
on esitetty kuvassa 72.



Kuva 72. Eri koehenkilöiden digitoiduille papereille antamat pisteet.

Digitointien saamille pistesummille laskettiin korrelaatiot objektiiviseen paperin kiil-
toon nähden (taulukko 38).

Taulukko 38. digitointien korrelaatiot.

	<i>pistesumma</i>	0/75
<u><i>pistesumma</i></u>	1,00	
<u>0/75</u>	-0,69	1,00

	<i>pistesumma</i>	45/45
<u><i>pistesumma</i></u>	1,00	
<u>45/45</u>	-0,49	1,00

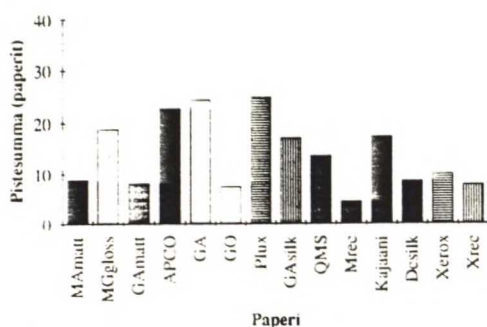
	<i>pistesumma</i>	<i>Ra</i>
<u><i>pistesumma</i></u>	1,00	
<u><i>Ra</i></u>	0,62	1,00

Digitoitujen paperien subjektiivisen kiillon ja objektiivisen papereista mitatun kiillon välillä on negatiivinen korrelaatio kertoimilla $-0,69$ ($75^\circ/75^\circ$) ja $-0,49$ ($45^\circ/45^\circ$). Tämä tarkoittaa sitä, että objektiivisesti mitatuilla korkeakiiltoisilla näytteillä on digitoinnissa matala kiilto. Nämä korkeakiiltoiset näytteet ovat toisaalta pintarakenteeltaan sileitä. Digitointien ja subjektiivien kiillon ja karheuden välille löytyykin korrelaatio kertoimella $0,62$, joka indikoi sitä, että visualisointi systeemi on kyennyt esittämään vain pinnan karheudeltaan karheitten papereitten kiillon (kuvat 73-77). Digitointien ja paperi-orginaalien saamien pistesummien välillä ei ole merkittävää korrelaatiota (taulukko 39). Syynä tähän on sekä digitoidessa pinnan kiiltojakauma on lähinnä diffuusi (haluttiin pinnasta normaali suuntainen detektio), että karheilla papereilla on luonnostaan korkea luminanssikontrasti. Eräs syy eroon on se, että paperien parivertailutilanteessa koehenkilöt ovat voineet hakea paperin kiiltoa muuttamalla katselukulmaa. Digitoitaessa korkeakiiltoisten paperien globaali kiilto on siirtynyt keskimääräisen luminanssitason kasvuksi. Kun taas matalakiiltoisilla, karheilla papereilla kiilto on enemmän paikallista ja täten käytetyllä CCD-kameralla helpommin detektoitavissa.

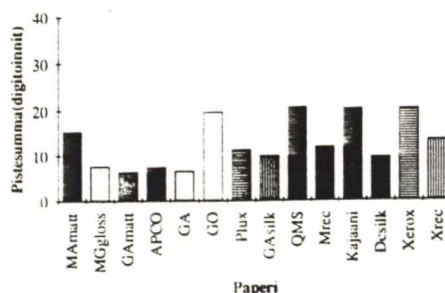
Toisaalta käytetty näytön värilämpötila rajoittaa korkeakiiltoisten paperien näyttövisualisointia, maksimi luminanssi D65-tilassa ~ 104 Cd/m². Jos papereita ja painojälkeä halutaan visualisoida toimistoympäristössä on paperien keskimääräinen luminanssin oltava tällöin ~ 100 Cd/m². Tarja Peromaan lisensiaattityön perusteella ihmisilmä detektoi kiillon paperista 20 Cd/m² kiiltoerolla. Jotta kyseisellä näytöllä voidaan esittää korkeakiiltoisia papereita luonnollisessa toimistoympäristössä, tulee näytön värilämpötila säätää esim D75, jolloin myös maksimi luminanssi kasvaa. Siirros D65 \rightarrow D75 siirtää toisaalta myös näytön väriavaruutta. D65 on saavuttanut de-facto standardin aseman tarkastellessa ja mitattaessa näytöllä objektien värillisyyttä. Käytetty visualisointiasema kalibroitu D65-tilaan sopiikin hyvin päällystämättömien papereiden visualisointiin.

Taulukko 39. Digitointien ja paperien saamien pistesummien välinen korrelaatio

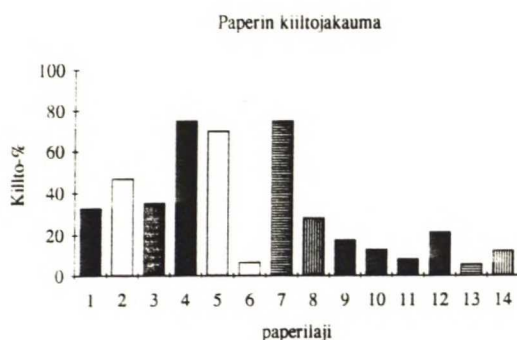
	<i>Ri pap</i>	<i>Ri dig</i>
<i>Ri pap</i>	1,00	
<i>Ri dig</i>	-0,34	1,00



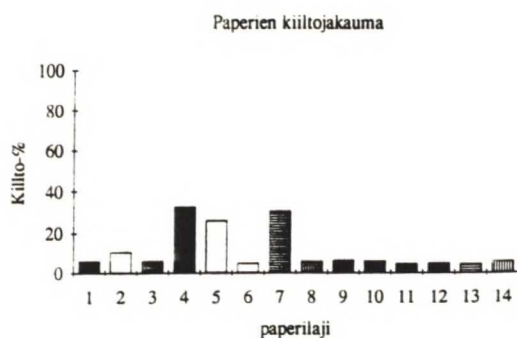
Kuva 73. Paperien pistesummajakauma



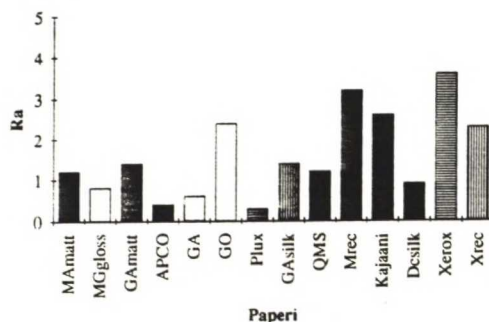
Kuva 74. Digitointien pistesummajakauma



Kuva 75. Paperien kiilto 75°/75°-geometriassa.



Kuva 76. Paperien kiilto 45°/45° geometriassa.



Kuva 77. Paperien Ra-jakauma.

14 JOHTOPÄÄTÖKSIÄ

Työn kokeellisessa osassa määritettiin käytettävän visualisointisysteemin laatu, kalibroitiin systeemi vakiotilaan ja suoritettiin paperiorginaalien ja digitoitujen paperien parivertailut visualisointiaseman hyvyyden todentamiseksi. Laatumittausten perusteella todentui näytön luminanssi- ja värillisyyssvariaatiot yli näyttöpinnan. Nämä variaatiot ovat voimakkaimillaan näytön reuna-alueilla. Käyttämällä visualisoinnissa näyttöpinnan stabiilimpaa keskialuetta voidaan paikkavariaatioiden vaikutus minimoida. Kalibroimattoman näytön luminanssimaksimi on likimain 139 Cd/m². Kalibroimalla näyttö pystyttiin laajentamaan näytön väriavaruutta, toisaalta luminanssimaksin laskun kustannuksella (104 Cd/m²). Kalibroimalla näyttö vakiolliseen tilaan ja tuntemalla näytön primäärifosforien värillisuus pystyttiin rakentamaan konversiomatriisit CIE XYZ-avaruudesta RGB-avaruuteen ja päinvastoin.

Paperiorginaalien ja digitoitujen paperien parivertailut analysointiin osin MDS-analyysiin perustuvalla metriikalla ja osin pistesumma-menetelmällä. MDS-analyysiin soveltuvia testejä tehtiin 5 kappaletta eri katseluetäisyyksiltä, pistesumma-analyysin soveltuvia testejä tehtiin 2 kappaletta. Paperiorginaalien parivertailujen MDS-analyysin perusteella testissä 1, jossa 14 koehenkilöä määrittä paperien erilaisuutta/samanlaisuutta koehenkiöt käyttivät päätöskriteerinä vain sävyä (katso liite 10/1(6)), vaikkakin MDS-malli tuki 3 dimensiota päätöskriteerissa. Syynä on luultavasti se, että käytetyt dimensiot jakaantuivat epätasaisesti yli koepopulaatio. Tällöin tietty dimensio ei ehkä ole saanut

suurta painoarvoa MDS-ohjelman mallinlaskennassa. Testissä 2, jossa koehenkilöiden määrä vähennettiin viiteen ja näytteiden määrän olessa 11. Tähän oli syynä se, että poistamalla näytepopulaatiosta selvästi erilaiset paperit (Mrec. Xrec, Kajaani) saataisiin enemmän erottelua pääjoukkoon. Koehenkilöt valittiin pienimmän keskivirheen perusteella, mikä pitäisi näkyä koehenkilöjoukon mielipiteen yhdenmukaistumisena. Tuloksena koehenkilöt havaitsivat papereista kaksi dimensiota, kiillon ja sävyn. Digitoitien MDS-analyysin perusteella testitilanteessa 3, joka vastasi testitilannetta 1, koehenkilöt käyttivät vaaleus- ja sävydimensiota. Testin 4 MDS-analyysin laskemien dimensiokoordinaattien ja laatulukujen välille ei löydetty merkittävää korrelaatiota. Luultavasti erottelumekanismi on ollut sävy, joka oli testitilanteessa 5 päätöskriteeri. Testitilanne 5 eroaa 4 siinä, että koehenkilöt tarkastelivat paperin näyttösimulaatiota metrin lähempänä. Tämä näkyy korrelaatiokertoimen kasvuna. Tulosten perusteella MDS-analyysin tulokset orginaalipapereiden ja digitoitujen paperien välillä pääsääntöisesti eroavat toisistaan.

Visualisoinnin toimivuutta testattiin myös suoralla kysymyksenasettelulla: "Kumpi papereista on kiiltävämpi ?", Testien tuloksena koehenkilöt havaitsivat kummassakin vertailutilanteessa kiiltoa, mutta laadultaan erilaista. Näytöltä testi suoritettiin 0,50 m päästä, mikä vastaa MDS-analyysitestejä paremmin orginaalipapereiden havainnointitietäisyyttä. Toisaalta tällöin näyttöresoluutio on alhaisempi. Paperien kiiltoerottelu korreloi spekulari kiillon kanssa. Tämän selittäjä on ehkä se, että koehenkilöt ovat testitilanteessa muuttaneet katselukulmaa ja hakenet kiiltoa paperista. Näyttöesityksessä kiilto on lähinnä diffuusi, johtuen digitoingeometriasta. Tällöin karheat paperit ovat erottuneet tasalaatuisista kiillon perusteella. Eri testitilanteiden tulokset on esitetty taulukossa 40.

Taulukko 40. MDS-analyysin ja pistesumma-analyysin yhteenveto.

Paperien MDS-analyysi	Dimensioiden määrä	Laji
Testi 1	1	sävy
Testi 2	2	kiilto,sävy
Digitoitien MDS-analyysi		
Testi 3	2	vaaleus,sävy
Testi 4	1	sävy
Testi 5	1	sävy
Paperien pistesumma	korrelaatio kiiltoon	havaittu kiiltolaji
	0.80	spekulaari
Digitoitien pistesumma		
	-0.69	diffuusi

Tulosten valossa voidaan todeta, että koejärjestely, jossa vertailtiin visualisointiaseman toimivuutta verrattuna luonnollisiin ärsykeisiin, ei kyennyt asettamaan vertailtavia ärsykeitä samaan järjestykseen mitattujen ominaisuuksien suhteen kuin normaalissa paperien parivertailutilanteessa. Tekijöitä jotka ovat mahdollisesti vaikuttaneet luonnollisen parivertailu ja visualisointiasemalla suoritettujen tulosten erilaisuuteen ovat:

- Havainnoitavan ärsykkeen erilaisuus: paperi contra paperin digitoitu kaksiluotteinen projektiio. Näyttövisualisoinnissa kaksidimensionaaliselta näyttöpinnalta tarkastellaan paperin saatua digitointisysteemin kaksidimensionaalista kuvausta.
- Paperin näyttöprojektion resoluutorajoitteisuus: kasvattamalla näyttöresoluutiota pidentämällä tarkasteluetäisyyttä vähennetään silmän kontrastiherkkyyttä. Seurauksena näytöltä havainnoitavien pienimittakaavaisten pintarakenteiden ja luminanssivaihtelujen erottelukyky laskee.
- Näytön luminanssidynamiikka eri ole riittävä jos halutaan visualisoida papereiden kiilto, kun paperin vaaleusarvo L^* on yli 90 yksikköä. Visualisointiaseman, jonka luminanssimaksimi on 104 Cd/m² kalibroituna D65-tilaan on tällöin riittämätön tuottamaan kiiltohavainto digitoinnin valaitustason vastatessa normaalia toimistoympäristön valaistusta. Toisaalta käytetty digitoingeometria tuo esiin vain paperin diffuusin kiillon. Digitoinnin tapahtuessa spekularikulmasta paperin näyttöesityksessä voidaan havaita kiiltoa, mutta paperista saatava kuvaus on vääristynyt.

Huolimatta tulosten huonosta korrelaatiosta on paperin/painojäljen näyttövisualisointi panostamisen arvoinen tutkimusalue.

15 KEHITYSKOHTIA

Systeemin parantamiseksi digitointiin käytettävä kamera tulisi vaihtaa RGB CCD-kameraksi, jolla on riittävä luminanssidynamiikka (digitointi 10 bit/pikseli => 1024 sävyä/osaväri). Digitointi tarkkuutta tulisi kasvattaa nykyisestä 512 x 512 pikselistä esim. 1024x1024 pikseliin. Tämä toisaalta kasvattaa kuvatiedostojen kokoa. Nykyisellä resoluutiolla yksi täysvärikuva vie 786 ktavua, kun resoluution parannuksen johosta yhden kuvatiedoston koko kasvaisi 3,1 Mtavuun.

Digitoiteja tulisi tehdä spekularikulmassa lähellä 0°, jolloin pinnandetektio olisi mahdollisimman normaalinsuuntainen. Esimerkiksi valaisu/detektio geometrialla 10°/10° , tällöin poikkeama pinnan normaalista on mahdollisimman pieni ilman että CDD-kamera aiheuttaa varjoa paperipinnalle ja kuvaus on mahdollisimman terävä kuva-alueella . Tuloksena saataisiin paperin kiiltokomponentti paremmin esiin. Nykyisessä

järjestelyssä kiilto on lähinnä diffuusia. Lisäksi systeemiä olisi testattava vertailemalla luonnollisia papereita näytöllä visualisoituihin papereihin. Rasterirakenteen ja paperin vuorovaikutuksen simuloimista voidaan kehittää ohjelmistopohjalta.

Suosittelava katseluetäisyys kiiltosimulaatioissa on ~ 50 mm. Tällöin näytön luminanssidynamiikka on D65-tilassa riittävä, toisaalta näytön resoluutio on alhainen. Rasterirakennesimulaatioissa voidaan käyttää 3 m katseluetäisyyttä eri rasterilinjatiheyksien generoitavuuden kannalta.

Nykyisellä kokoonpanolla visualisointiasema sopii hyvin normaalin kuvamateriaalin laaduntarkkailuun (esim parivertailu) ja näyttövedostukseen. Kalibroitu liitântä CANON 500 CLC väritulostimeen mahdollistaa lisäksi kovakopiovedostuksen.

LÄHDELUETTELO

1. **ANSI/HFS 100-1988, American National Standard for Human Factors Engineering of Visual Display Terminal Workstations**, The Human Factors Society Inc. 90 s.
2. Barten, P., G., J., **Physical model for the contrast sensitivity of the human eye**. SPIE, Human Vision, Visual Processing and Digital Display III, Vol. 1666, 1992. s. 57-72
3. Barten, P., G., J., **The Square Root Intergral (SQRI): A metric to describe the effect of various display parameters on perceived image quality**. SPIE, Human Vision, Visual Processing, and Digital Display, Vol. 1077, 1989, s. 73-82
4. Barten, P., G., J., **Image Quality of CRT Displays**, SID Seminar M-2 1990, s. M2.1 -M2.24
5. Bechis, J., D., **CRT technology survey**, Information Display, (1991):12, s. 8-12
6. Beretta, G., **The Meaning of white**, ISGT's Eight International Congress on Advances in Non-Impact Printing Technologies (1992). s. 451-454
7. Berns, R., S., **Color WYSIWYG: A Combination of Device Colorimetric Characterization and Appearance Modeling**. SID Digest 1992. s. 549-552
8. Brill, M., H., Derefeld, G., **Reference White Standards for Video Displays Units**, SPIE Human Vision, Visual Processing and Digital Display, Vol. 1077, 1989, s. 364-369
9. Bristow, J., A., Johansson, P., Å. **Subjective evaluation by pair comparison: Pitfalls to avoid and suggestions for the presentation of results**. STFI-meddelande serie A nro 919. 13 s.
10. Cakir, A., Hart, D., J., Stewart, T., F., M. **The VDT Manual**. IFRA 1979. 253 s.
11. **ConsistentColor, Installation and User Guide**. MATROX. 33s.

12. **Digitaalinen kuvakäsittely**, Opetusmoniste. Teknillinen korkeakoulu. 29 s.
13. Eccles, D., Romans, G., Held, J., **HDTV-good enough for data?**, Information Display (1993), s. 16-19
14. **Elektronisk Bildbehandling**, NATS. Statens Tekniska Forskningcentral(VTT). Grafiska laboratoriet 1992. 176 s.
15. Engeldrum, P., E., **Analysis of White Point and Phosphor Set Differences of CRT Display**, Color research and application, 15(1990):3, s. 151- 155
16. Feng, Y., Österberg, O., Lindström, B., **MTFA as a measure for computer displays screen image quality**, Displays, (1990)10, s. 186-192
17. Grandjean, E., **Ergonomics on Computerized Offices**. Taylor&Francis. London 1987. 222 s.
18. Industrial Meters, **Luminance Meter LS-110**. Minolta. 10 s.
19. Infante, C., **On the resolution of raster-scanned CRT displays**, SID Proc, 26(1985):1. 23 s.
20. Infante, C., **Numerical methods for computing modulation transfer-function area**, Displays, (1991):4, s. 80-83
21. **ISO 9241/Part 8**. ISO Proposed Committee Draft Standard.
22. Kane, Jr., J., J., **Instrumentation for Monitor Calibration**, SMPTE 1990, s. 744-752
23. Kittilä, J., **Värillisyyden muodostuminen NON-impact menetelmissä**. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Graafisen tekniikan laboratorio. Otaniemi 1992. 84 s.
24. Laihanen, P., **Digitaalinen painokuva värireproduktio väriopilliselta kanalta tarkasteltuna**. Teknillinen korkeakoulu, Graafisen tekniikan laboratorio, Tutkimusraportti 9. Otaniemi 1988. 109 s.
25. Leekley, R., M., Tyler, R., F., Hultman, J., D., **The Effect of surface Reflecti-on on Color**. TAGA Proceedings 1978. s. 291-311

26. Leppänen, T., **Sanomalehden digitaaliselle värireproduktiolle asetettavat vaatimukset**. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Graafisen tekniikan laboratorio 1988. 153 s.
27. Lyne, M., B., **Multidimensional Scaling of Print Quality**
28. Lyne, M.B., Parush, A., Richter, F., Jordan, b.d., Donderi, D.C., Ramsay, J.O., **Multidimensional analysis of paper-related factors in the subjective evaluation of print quality**, The Role of Fundamental Research in paper-Making. (ed. J.Brander) vol.2, Mechanical Engineering Publications, London 1983, s. 655-683.
29. Masterman, H., C., **Designing standards-compliant monitors: Where are the problems?**, Information Display (1991):9, s 13-17
30. Maxwell, C., D., **Acceptable image quality for color VGA**, Information Display, (1991):6, s. 8-13
31. Murch, G., M., **Visual Perception Basics**. SID Seminar 2 1987, s. 2.2 - 2.36
32. Novak, C., L., Shaver, S., A., Wilson, R., G., **Obtaining Accurate Color Images for Machine Vision Research**. SPIE, Perceiving, Measuring, and Using Color, Vol. 1250, 1990. s. 54-68
33. Nystrom, B., D., Fairchild, M., D., **Perceived image quality of 16:9 and 4:3 aspect ratio video displays**, Journal of Electronic Imaging, (1991):1, s. 99-103
34. Näsänen, R., **Effects of Halftoning and Noise on Visual Perception of Spatial Signals**. Tutkimusraportti 16. Teknillinen korkeakoulu, Graafisen tekniikan laboratorio. Otaniemi 1988. 48 s.
35. Oittinen, P., Saarelma, H., **Kuvatekninen laatu**. Otakustantamo julkaisun nro 881, Otaniemi 1991. 138 s.
36. **Operating Manual for Photo Research Spectrascan Fast Spectral Scanning System (PR-703 A/PC)**, Photo Research. California. 32 s.
37. Peli, E., **Display nonlinearity in digital image processing for visual communications**, Optical Engineering, 31(1992):11, s. 2374-2383
38. Peromaa, T., **Ihmisen näköjärjestelmän modulaation siirtofunktio ja sen soveltaminen**. Teknillinen korkeakoulu, Graafisen tekniikan laboratorio, Tiedonanto 16, Espoo 1993. 35 s.

39. Peromaa, T., **Killtohavainnon muodostuminen akromaattisella, tasomaisella pinnalla.** Helsingin Yliopisto, Psykologian laitos. Lisenssiaattityö, 1993. 66 s.
40. Peromaa, T., Oittinen, P., **Painojäljen kiillon muodostuminen visuaalisesti ja mittauksellisesti,** Paperi ja Puu- Paper and Timber 73(1991):8, s. 753-761
41. **Photo Research PR-900 Video Photometer.** Tuote-esite, 7 s.
42. **prEN 29241-3:1992.** 34 s.
43. **Principles of visual ergonomics - The lighting og indoor work systems.** ISO-8995:1989(E). s. 27
44. Ramsay, J., O., **Multiscale Manual (Extended version).** McGill University, Department of Psychology, Canada. 147 s.
45. Rao, R., A., Lohse, J., **Indentifying high level features of texture perception.** SPIE, Human Vision, Visual Processing and Digital Display III, Vol. 1666, 1992. s. 424-435
46. Ryti, N., **Paperitekniiikan perusteet.** Otakustantamo 289. Otapaino 1988. 169 s.
47. Saarelma, H., **Kuvien korostus ja korjailu.** Digitaalinen kuvakäsittely. INSKO 102-82
48. Saarelma, H., Oittinen, P., **Fundamental of Printing Technology.** Teknillinen korkeakoulu, Graafisen tekniikan laboratorio, 1993. s. 240
49. Saarelma, H., Oittinen, P., **Graafinen materiaalitekniikka.** Otakustantamon julkaisu nro 493. Otaniemi 1987.
50. Saarelma, H., Oittinen, P., **Kuvatekniiikan perusteet.** Otakustantamo julkaisun nro 842B. Otaniemi 1986. s.
51. **Solid-State CCIR CCD Monochrome Camera. 4700 Series.** COHU Inc. Electronics Division. 4 s.
52. **Special issue on Visualization in Scientific Computing,** Computer Graphics, 21(1987):6, s. A1-C9.
53. **Spectrophotometer CM-1000,** User's Reference Manual, Minolta. 123 s.

54. **Subjektiiivinen arvostelu.** VTT menetelmäkuvaus. 8 s.
55. **Surftest 402 Sarja 178 Pinnankarheuden mittalaite,** Käyttöohje. 52 s.
56. Tominaga, S., **Production of Realistic 3-D Object Color on a Monitor,** SID Digest, 1992, s. 373-376
57. Tuovinen, P., **Detektio ja tallenne tekniikka.** Teknillinen korkeakoulu, Graafisen tekniikan laboratorio. Luentomoniste 1. 1 s.
58. van Raalte, J., A., **CRT's for high-definition television,** Information Display, (1991):1, s. 6-10
59. **Videotekniikka.** Opetusmonisteet K-91. TKK, Sähkötekniikan osasto. 144 s.
60. Westerlink, J., H., D., M., Roufs, A., J., **Subjective Image Quality as a Function of Viewing Distance, Resolution, and Picture Size,** SPMTE Journal (1989):1, s. 113-119

LIITE 1

Näytön maksimi luminanssi tehdasasetuksessa

- näytön luminanssi ja kontrasti maksimissa.
- mittaus suoritettu PR-900- videofotometrillä

Maksimi luminanssi tehdasasetukset DOS-tilassa(VGA), kun koko näyttö on valkoinen

Keskiarvo	148,8 Cd/m ²
Hajonta	1,9 Cd/m ²

Maksimi luminanssi, tehdasasetukset WINDOWS- tilassa, kun näyttö on valkoinen

Keskiarvo	138,8 Cd/m ²
Hajonta	2,0 Cd/m ²

Näytön luminanssi dynamiikan mittaus LS-110 - mittarilla kalibroituna D65 tilaan:

Maksimi luminanssi :	104,0 Cd/m ²
Minimi luminanssi:	0,10 Cd/m ²
Luminanssi dynamiikka:	103,90 Cd/m ²

LIITE 2

JITTER

Mittaus 1	Position	H	V	F
		0,0079	0,0479	-0,009
	STDEV(H,V)	0,0003	0,0009	
	MAX STDEV(H,V)	0,0034	0,0132	
Mittaus 2	Position	H	V	F
		0,0079	0,0479	-0,0089
	STDEV(H,V)	0,0002	0,0007	
	MAX STDEV(H,V)	0,0032	0,0114	
Mittaus 3	Position	H	V	F
		0,0079	0,0479	-0,009
	STDEV(H,V)	0,0004	0,0005	
	MAX STDEV(H,V)	0,0057	0,0066	

GEOMETRIC DISORTIONS

Sae geometric Disortions

A	B		C		Linearity	39,39	%
					Keystone	0,031	%
	J				Orthogonality	-0,065	%
D	M	E	K	F	Pincushion/barrel	0,503	%

Eia Geometric Disortions

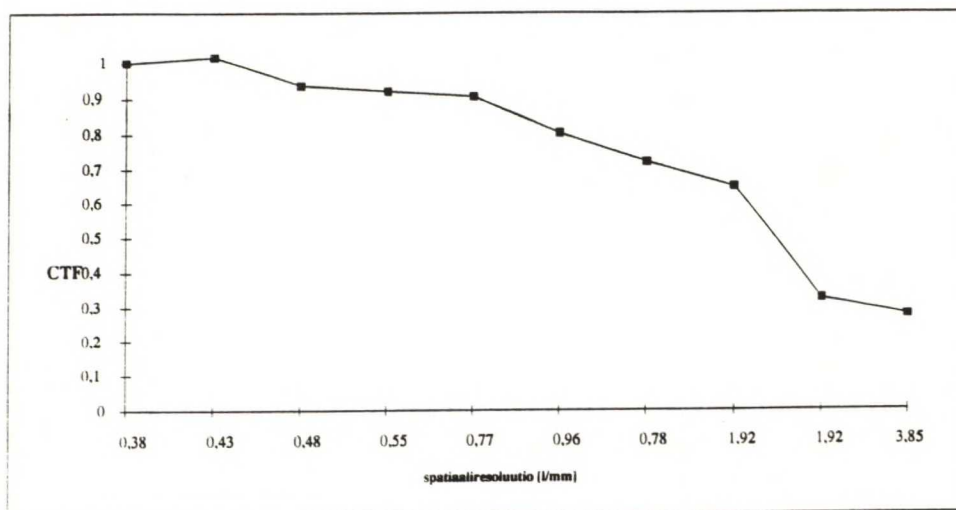
G	H	I	Horizontal Rotation	-0,0001	meter
			Horizontal Bending	-0,0005	meter
			East-West Rotation	0,0005	meter
			East-West Pincushion	-0,577	%
			East-West Bending	-0,0001	meter
			East-West Trapeziod	-0,031	%
			North-South Bending	-0,0002	meter
			North-South Trapeziod	0,003	%
			North-South Rotation	0,0001	meter
			North-South Pincushion	0,0002	meter
			Vertical Rotation	0,0001	meter
			Vertical Bending	-0,184	%

ISO Geometric Disortions

Horizontal	Linearity Distortion	0,061	%
Vertical	Linearity Distortion	0,006	%
	Orthogonality Distortion	0,129	%

LIITE 3

Näytön CTF mitattuna vihermustasta pystysuorista taajuuden suhteen muuttuvasta palkkikuviosta (pikseli = 0,26 mm).



LIITE 4

Värimittaukset ICL (tehdasasetus, windows-tila, 1600*1200 resoluutio)

CIE x,y 1931, MINOLTA CA-100 mittarilla

WHITE			
	x	y	Y
M1	0,244	0,289	113
M2	0,241	0,284	103
M3	0,254	0,284	81,5
M4	0,244	0,289	96,6
M5	0,243	0,287	100

Keskiarvo	0,25	0,29	98,82
Hajonta	0,005	0,003	11,45

RED			
	x	y	Y
M 1	0,573	0,333	30,8
M 2	0,563	0,332	27,4
M3	0,569	0,328	23,1
M4	0,565	0,332	26,4
M5	0,566	0,332	27,1

Keskiarvo	0,57	0,33	26,96
Hajonta	0,004	0,002	2,75

GREEN			
	x	y	Y
M1	0,272	0,584	139
M2	0,269	0,576	126
M3	0,273	0,575	96,5
M4	0,27	0,579	121
M5	0,27	0,578	124

Keskiarvo	0,27	0,58	121,30
Hajonta	0,002	0,004	15,47

BLUE			
	x	y	Y
M1	0,147	0,07	22,7
M2	0,148	0,07	21,1
M3	0,15	0,079	18,4
M4	0,148	0,079	20
M5	0,148	0,07	20,5

Keskiarvo	0,15	0,07	20,54
Hajonta	0,001	0,005	1,57

LIITE 5

Näytön CIE xy-mukainen värillisuus mitattuna D65-tilaan kalibroidusta näytöstä.

Red

x	y	Y
0,62	0,34	26,7
a	b	L
77,1	64,9	57,7

Green

x	y	Y
0,28	0,60	69,51
a	b	L
-91,7	76,7	85,4

Blue

x	y	Y
0,15	0,07	7,76
a	b	L
71,8	-102,8	32,84

White

x	y	Y
0,31	0,33	104,0
a	b	L
0,31	0,33	100

LIITE 6

Näytön CIE Lab värillisyyden isotrooppisuus mitattuna tehdasesetuksessa WIDOWS-tilassa.
Mittauspisteiden sijoitus yli näytön vastaa liitteen 7 sijoittelua (katso liite 7)

		L		a		b	
		keskiarvo	hajonta	keskiarvo	hajonta	keskiarvo	hajonta
Red	ulko	41,49	0,95	54,99	1,08	16,49	1,26
	sisä	42,42	0,69	56,12	0,69	17,79	0,62
Green	ulko	61,80	1,32	-68,59	1,53	35,47	1,71
	sisä	63,14	0,88	-70,19	0,79	37,17	0,42
Blue	ulko	29,10	2,03	60,11	3,28	-104,29	18,00
	sisä	29,47	1,72	61,07	2,42	-107,46	2,19
White	ulko	76,82	1,65	2,94	0,59	-34,74	1,19
	sisä	77,00	1,06	2,87	0,37	-34,59	1,16
Cyan	ulko	66,02	1,60	-30,35	1,40	-46,54	1,17
	sisä	67,64	1,04	-31,76	0,27	-46,56	1,14
Magenta	ulko	49,04	1,02	70,54	1,29	-72,98	1,40
	sisä	49,87	0,90	71,75	1,10	-73,83	1,65
Yellow	ulko	71,13	1,67	-16,81	1,11	45,11	2,57
	sisä	71,27	1,81	-16,89	0,98	45,34	3,11

LIITE 7

Luminanssi (Cd/m²) isotrooppisuuden mittausarvojen sijainti taulukossa kunkin osaväriin alla kuvaa mittauspisteen sijaintia näytöllä. Tunnuslukujen ylimmässä rivillä on huomioitu kaikki mittauspisteet näytöllä. Alemmalla tunnuslukurivillä on laskentaan otettu vain taulukon sisimmän kehiksen sisällä olevat mittausarvot. Mittaukset tehty tehdasaetuksista DOS-tilassa.

WHITE

47,74	46,89	48,17	46,36	45,51
46,06	49,02	51,42	47,84	44,05
45,40	50,82	53,80	48,81	44,00
45,06	49,07	48,68	47,19	44,18
45,80	46,95	47,44	45,07	45,08

KESKJARVO HAJONTA MIN MAX

ULKO	47,21	2,42	44,00	53,80
SISÄ	49,63	2,04	47,19	53,80

RED

12,91	11,92	12,39	11,97	11,88
12,06	12,31	13,16	12,31	11,51
11,77	12,74	13,72	12,64	11,31
11,67	12,69	12,51	12,13	11,37
12,05	12,13	12,32	11,60	11,67

ULKO	12,19	0,58	11,31	13,72
SISÄ	12,69	0,49	12,13	13,72

GREEN

30,36	30,54	31,09	30,05	29,38
29,65	31,88	33,34	31,10	28,60
29,32	33,43	34,69	31,74	28,69
29,13	31,99	31,72	30,82	28,60
29,33	30,49	30,78	29,31	28,99

ULKO	30,60	1,62	28,60	34,69
SISÄ	32,30	1,26	30,82	34,69

BLUE

5,44	5,08	5,19	5,02	5,14
5,19	5,16	5,48	5,03	4,75
5,00	5,43	5,71	5,06	4,66
5,00	5,28	5,25	4,97	4,78
5,10	5,06	5,06	4,85	5,10

ULKO	5,11	0,24	4,66	5,71
SISÄ	5,26	0,24	4,97	5,71

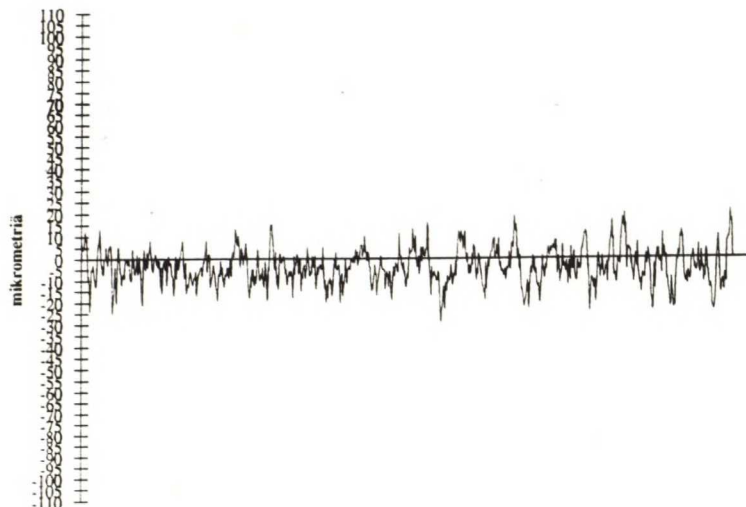
LIITE 8

Luminanssin ryömiminen, tehdaasetuksessa DOS-tilassa

GREEN

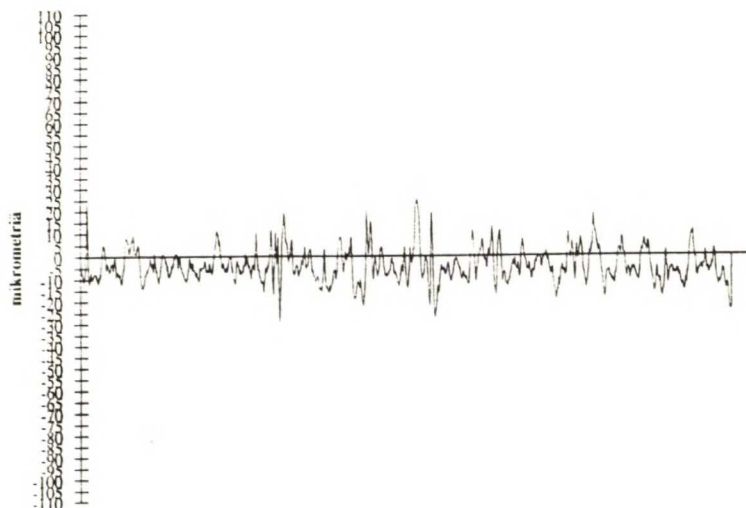
aika	L(Cd/m ²)
0 min	34,95
5 min	34,90
10 min	35,10
15 min	34,93
20 min	34,83
25 min	35,18
30 min	34,90
35 min	34,85
40 min	34,95
45 min	35,04
50 min	34,93
55 min	34,95
60 min	34,93
keskiarvo	34,96
hajonta	0,10

1pl



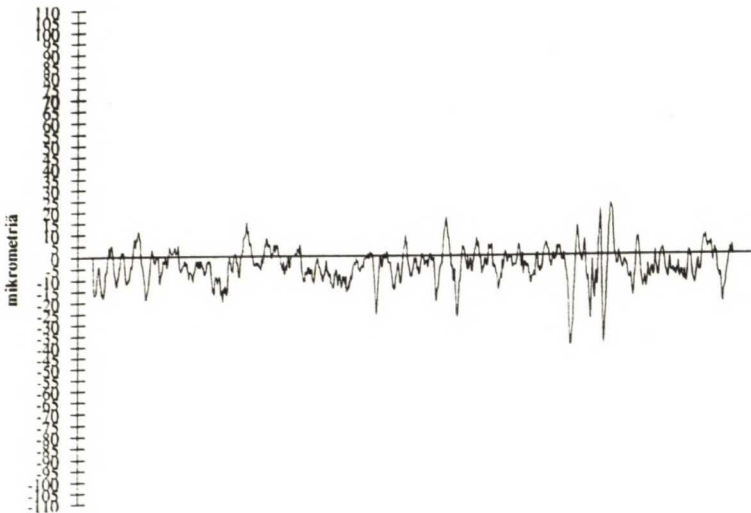
mittausmatka 2,56 mm

2pl

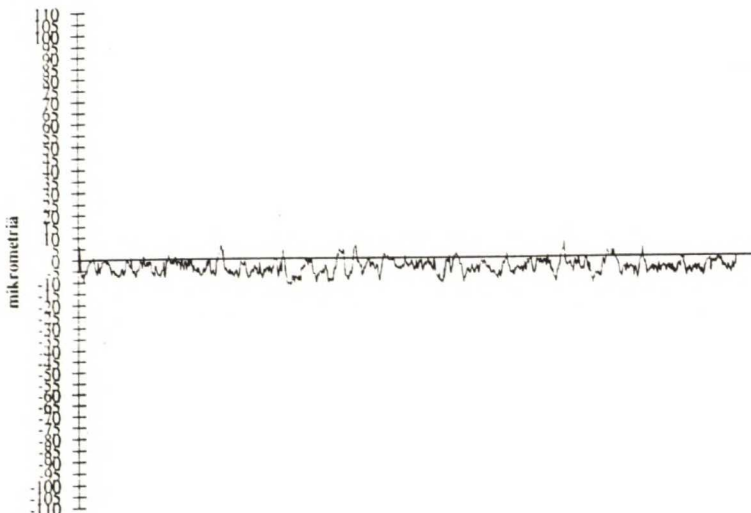


2,56 mm

3p1



4p3

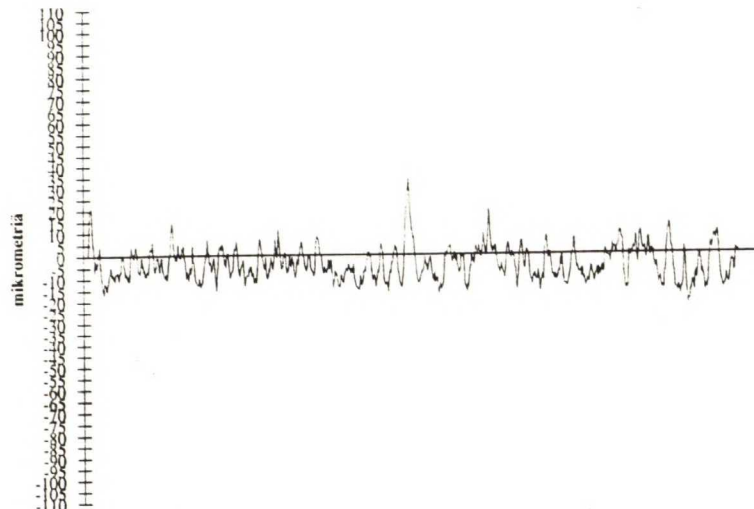


5p3



2.56 mm

6p1



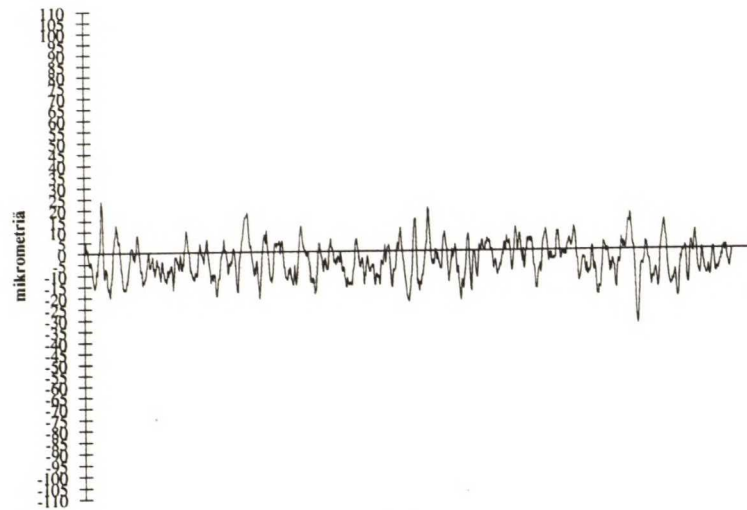
2.56 mm

7pl



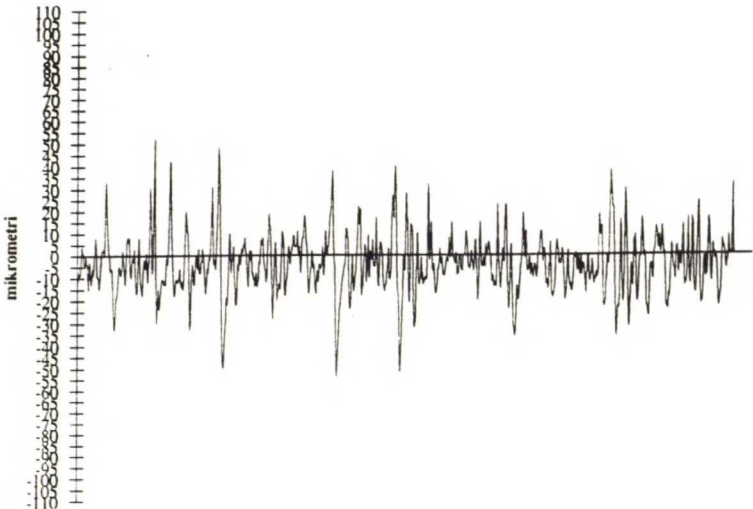
2,56 mm

8pl



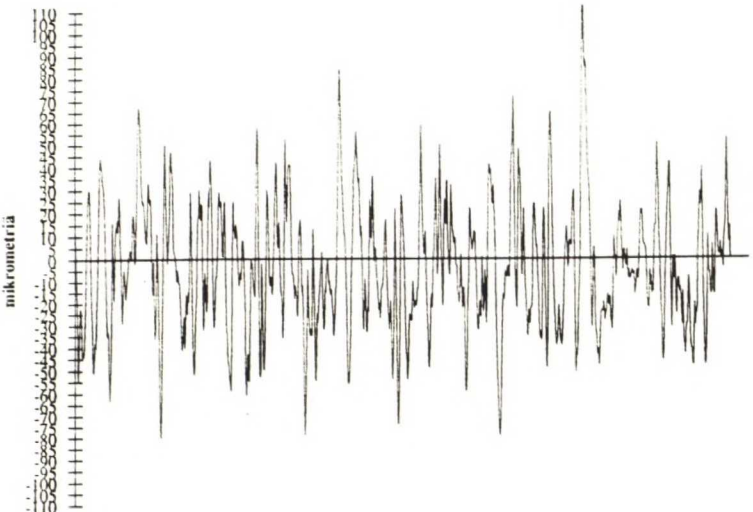
2,56 mm

9p1



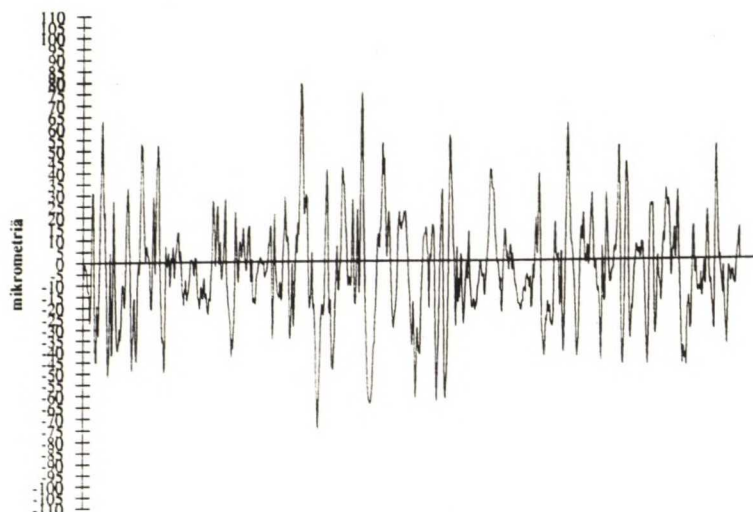
2,56 mm

10p1

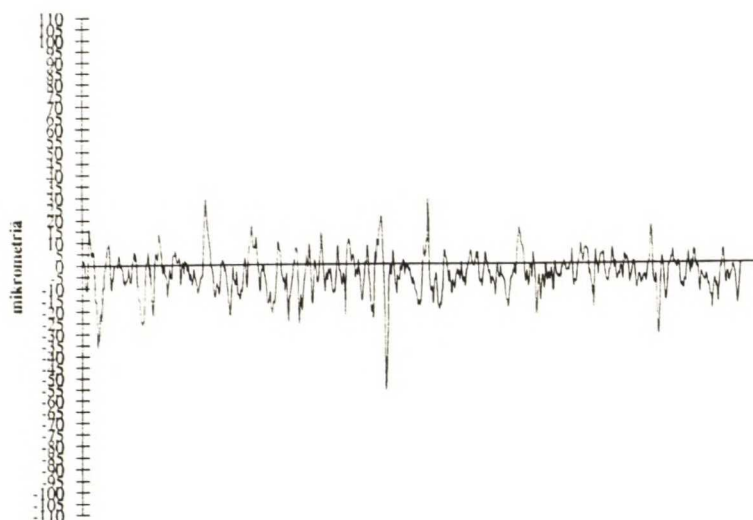


2,56 mm

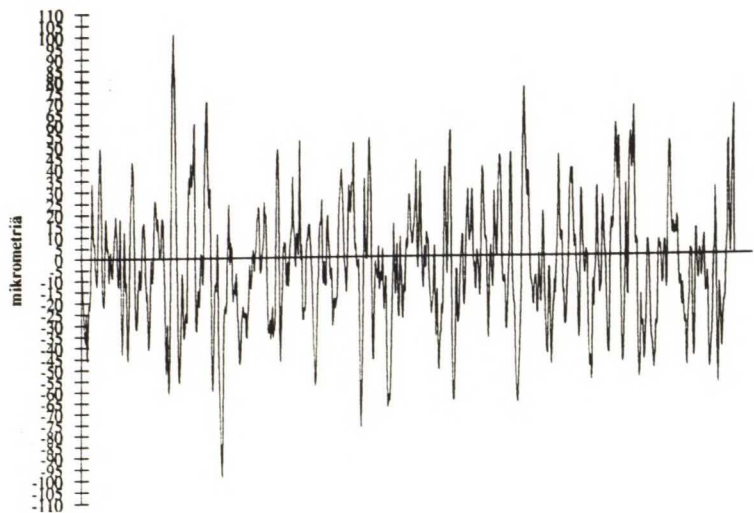
11p1



12p1

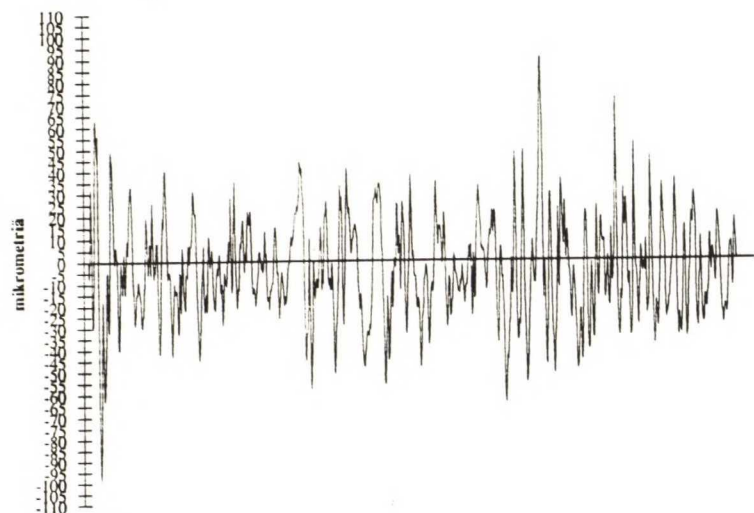


13p1



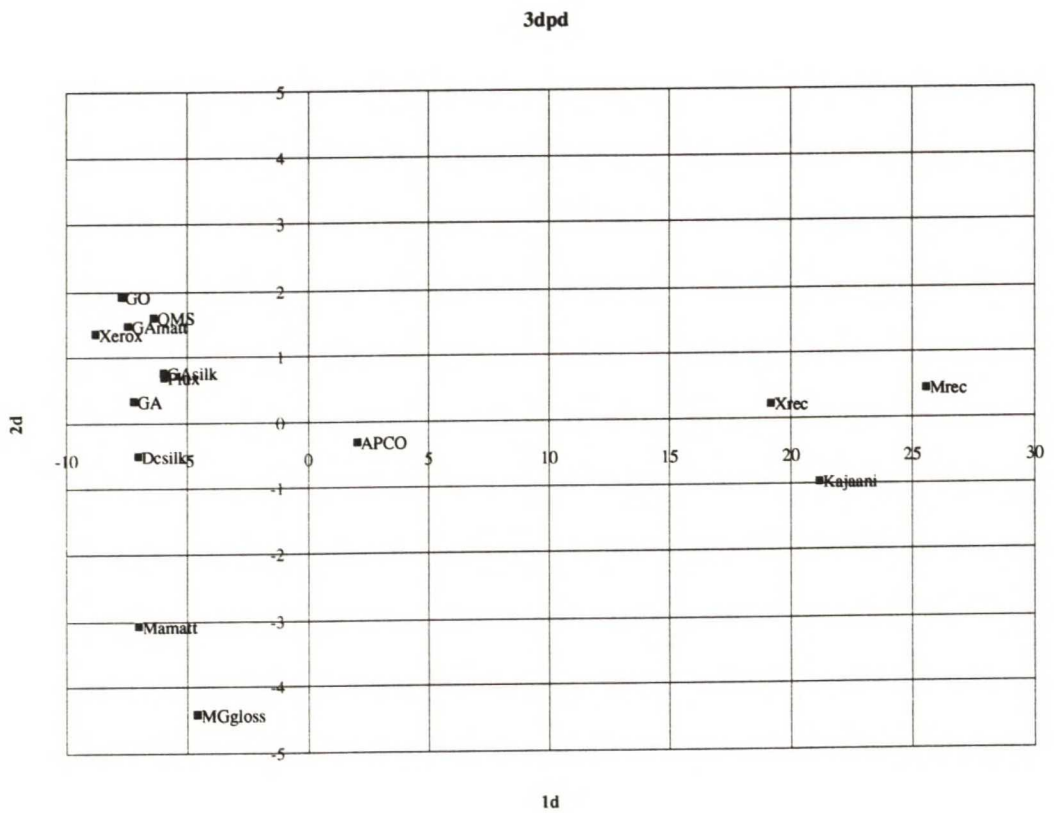
2,56 mm

14p1

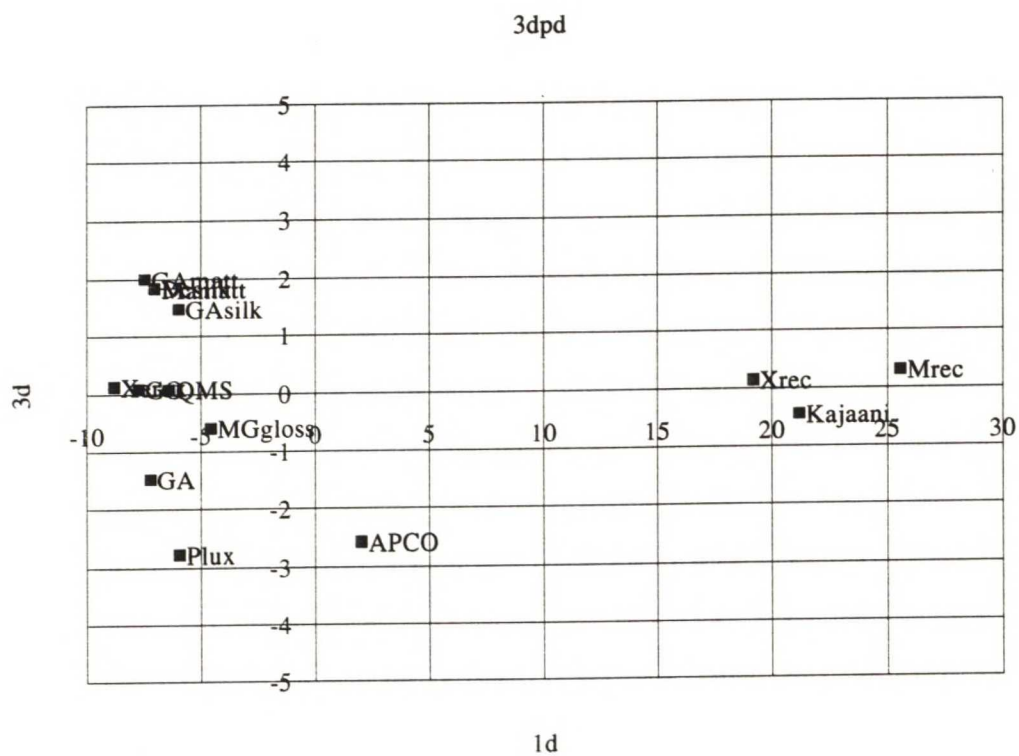


2,56 mm

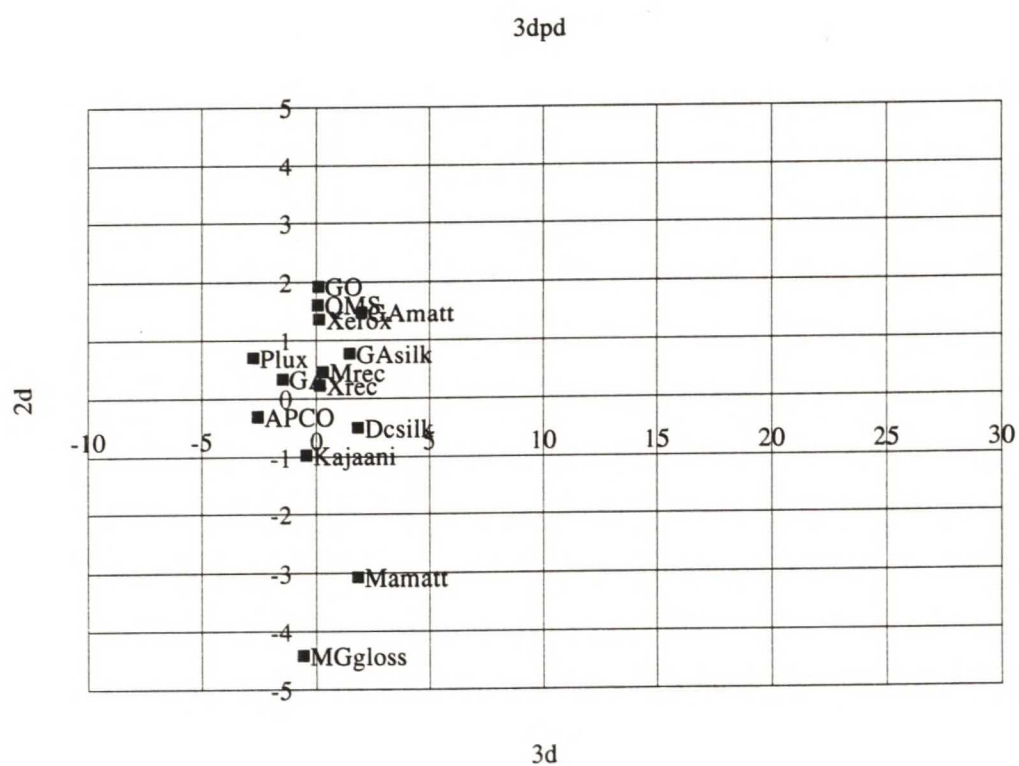
Testi 1, dimensio 1 vastaan 2



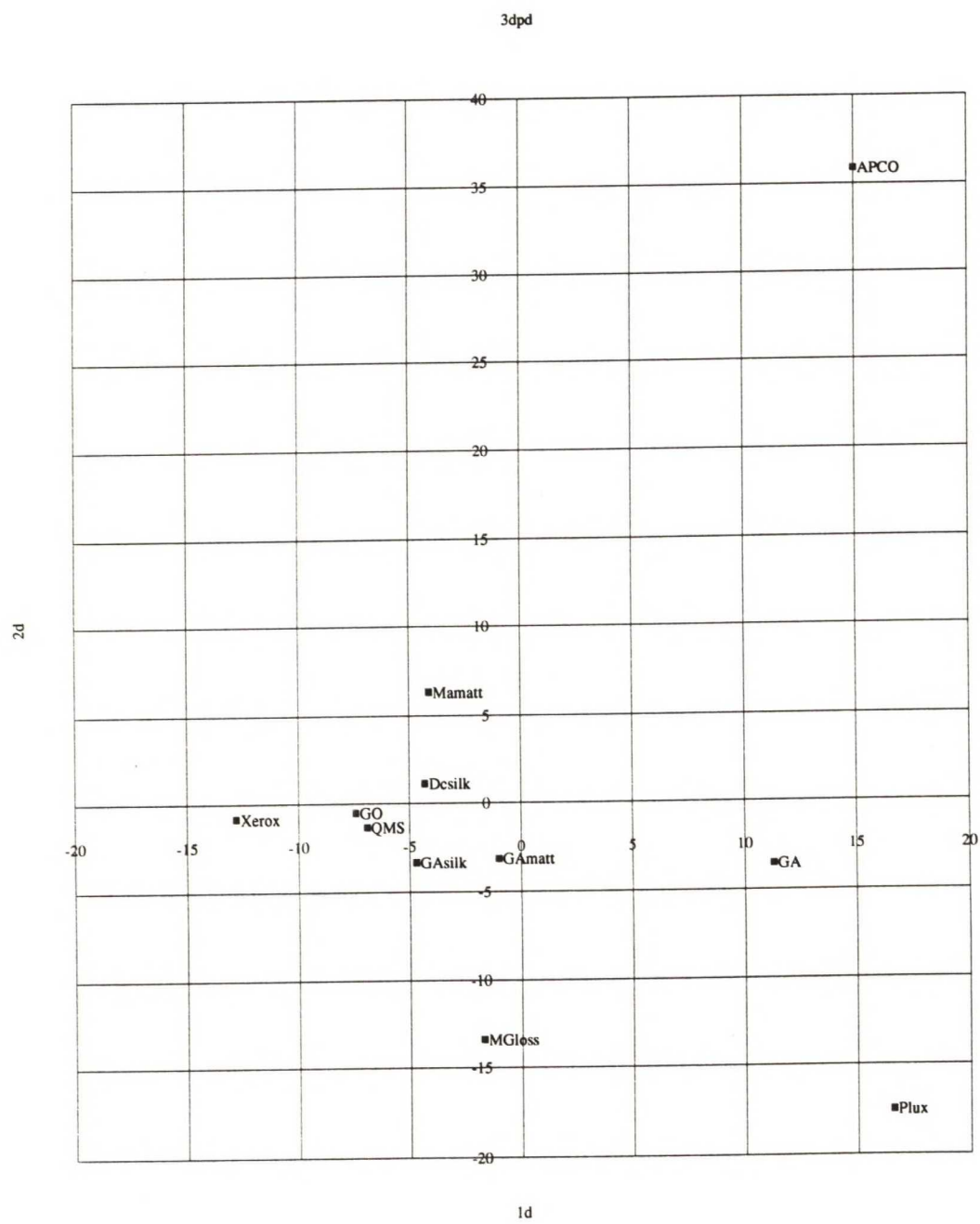
Testi 1, dimensio 1 vastaan 3



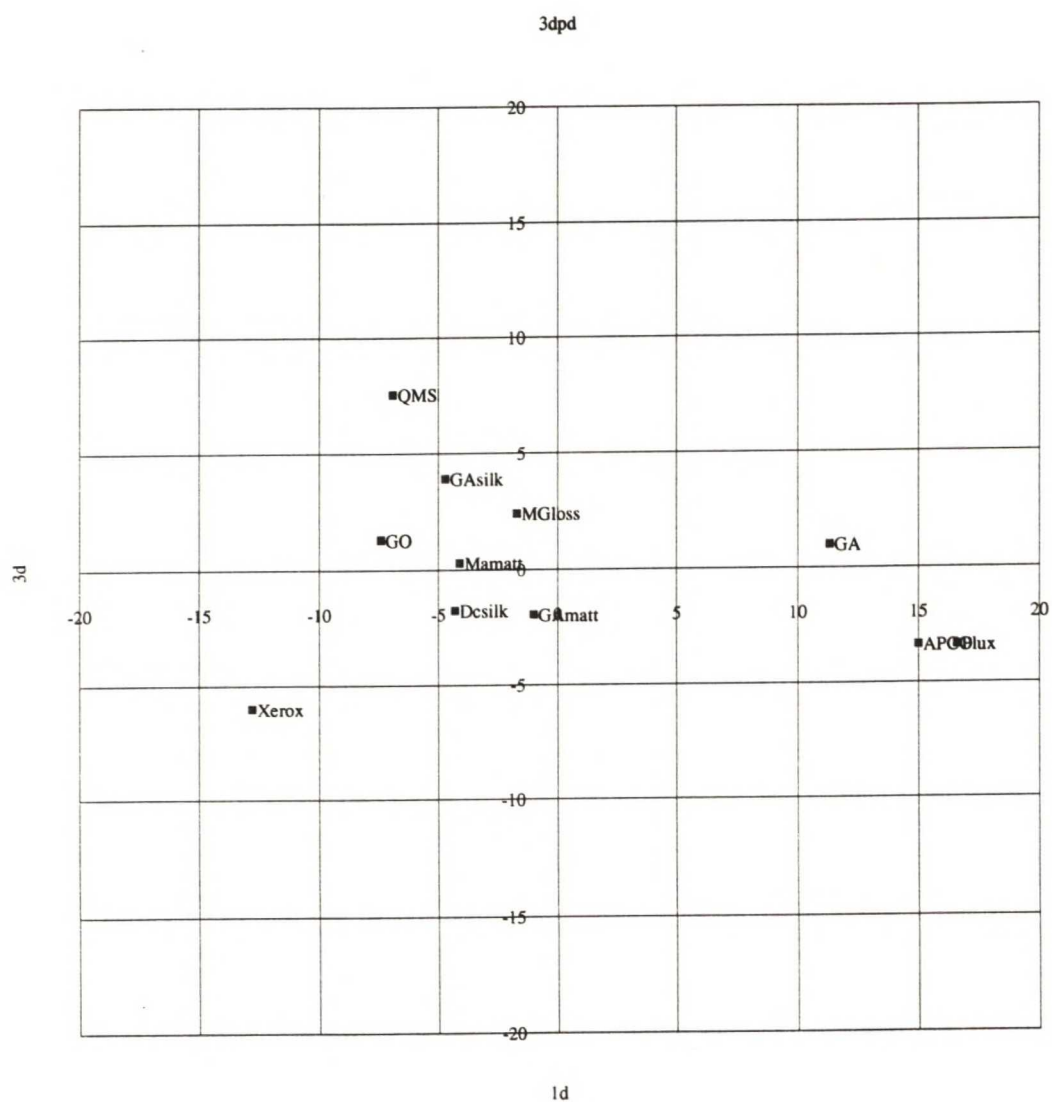
Testi 1, dimensio 2 vastaam 3



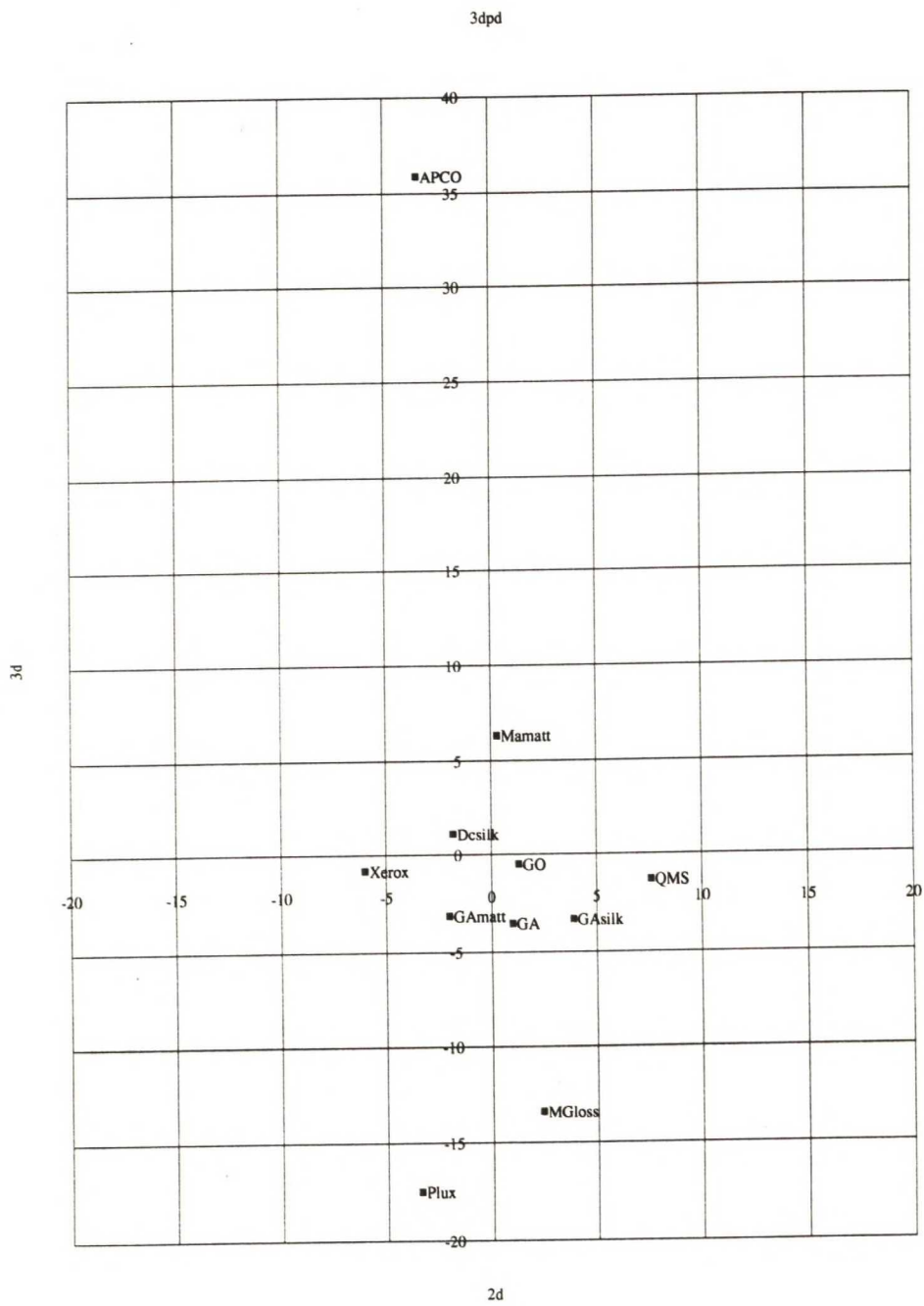
Testi 2, dimensio 1 vastaan 2



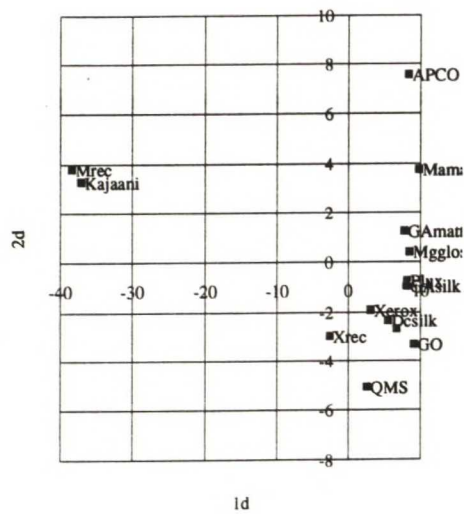
Testi 2, dimensio 1 vastaan 3



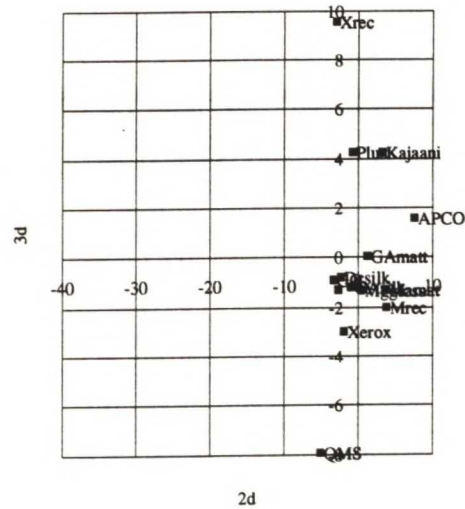
Testi2, dimensio 2 vastaan dimensio 3



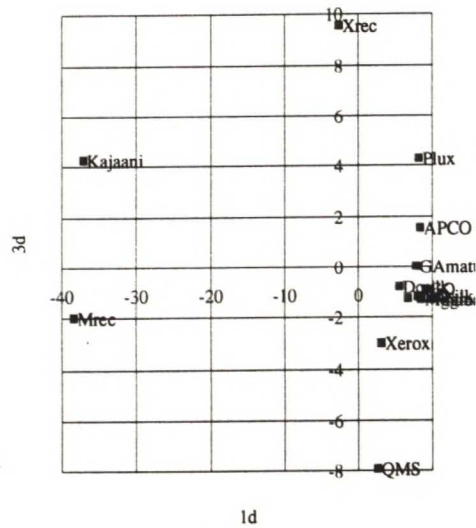
Testi 3, dimensio 1 vastaan 2



Testi 3, dimensio 3 vastaan 3

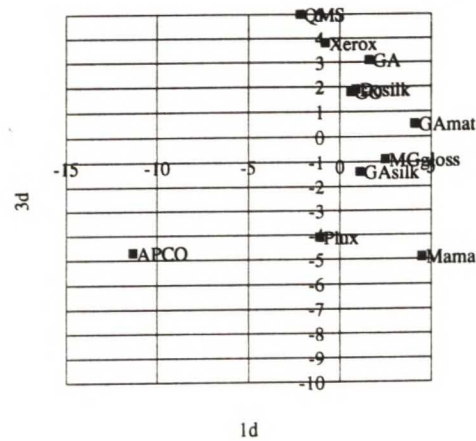
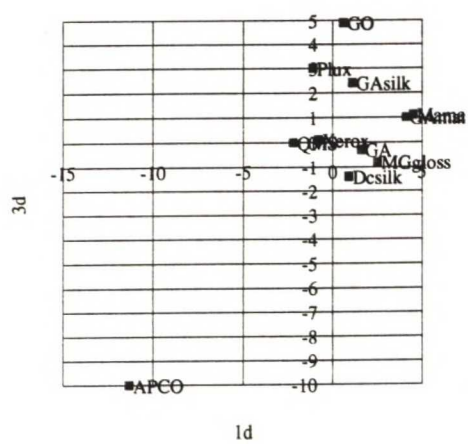


Testi 3, dimensio 1 vastaan 3

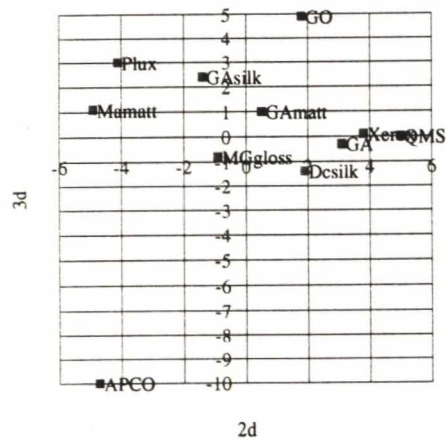


Testi 4, dimensio 1 vastaan 2

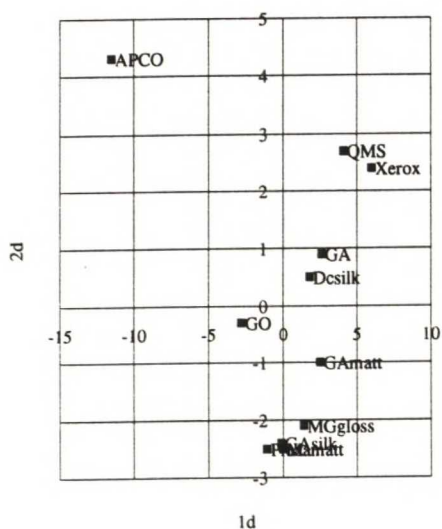
Testi 4, dimensio 1 vastaan 3



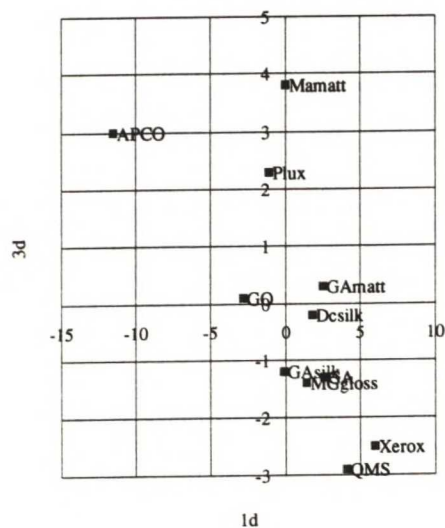
Testi 4, dimensio2 vastaan 3



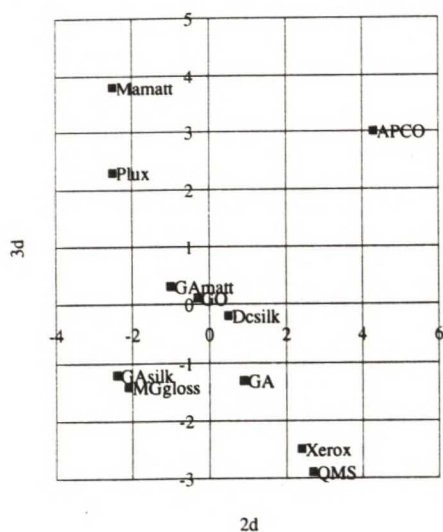
Testi 5, dimensio 1 vastaan 2



Testi 5, dimensio 1 vastaan 3



Testi 5, dimensio 2 vastaan 3



Testi 1, dimensio 3 vastaan kiilto 75/75-geometriassa

Regression Statistics 3d/75°/75°

Multiple R	0,63
R Square	0,40
Adjusted R Square	0,35
Standard Error	20,43
Observations	14,00

Analysis of Variance

	<i>df</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	1,00	3358,94	3358,94	8,05	0,01
Residual	12,00	5006,37	417,20		
Total	13,00	8365,32			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Statistic</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	32,05	5,46	5,87	0,00	20,16	43,94
x1	-10,57	3,72	-2,84	0,01	-18,68	-2,45

Testi 1, dimensio 3 vastaan kiilto 45/45-geometriassa

3d/45°/45°

Regression Statistics

Multiple R	0,84
R Square	0,70
Adjusted R Square	0,68
Standard Error	0,86
Observations	14,00

Analysis of Variance

	<i>df</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	1,00	21,13	21,13	28,37	0,00
Residual	12,00	8,94	0,74		
Total	13,00	30,07			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Statistic</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	1,37	0,35	3,97	0,00	0,62	2,13
x1	-0,12	0,02	-5,33	0,00	-0,17	-0,07

Testi 1, dimensio 1 vastaan L*

Regression Statistics *Id/L**

Multiple R	0,74
R Square	0,55
Adjusted R Square	0,52
Standard Error	8,52
Observations	14,00

Analysis of Variance

	<i>df</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	1,00	1076,55	1076,55	14,83	0,00
Residual	12,00	871,38	72,62		
Total	13,00	1947,93			

	<i>Coefficient</i> <i>s</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Statistic</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	237,63	61,76	3,85	0,00	103,07	372,18
x1	-2,64	0,69	-3,85	0,00	-4,14	-1,15

Testi 1, dimensio 1 vastaan b*

Regression Statistics *Id/b**

Multiple R	0,80
R Square	0,65
Adjusted R Square	0,62
Standard Error	7,57
Observations	14,00

Analysis of Variance

	<i>df</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	1,00	1260,89	1260,89	22,02	0,00
Residual	12,00	687,04	57,25		
Total	13,00	1947,93			

	<i>Coefficient</i> <i>s</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Statistic</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	2,05	2,07	0,99	0,34	-2,46	6,56
x1	2,70	0,58	4,69	0,00	1,45	3,96

Testi 2, dimensio 1 vastaan kiilto 75/75-geometriassa

Regression Statistics 1d/75°/75°

Multiple R	0,97
R Square	0,93
Adjusted R Square	0,93
Standard Error	2,64
Observations	11,00

Analysis of Variance

	<i>df</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	1,00	893,22	893,22	128,59	0,00
Residual	9,00	62,52	6,95		
Total	10,00	955,74			

	<i>Coefficient</i> <i>s</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Statistic</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	-13,77	1,45	-9,49	0,00	-17,05	-10,49
x1	0,37	0,03	11,34	0,00	0,29	0,44

Testi 2, dimensio 1 vastaan kiilto 45/45-geometriassa

Regression Statistics 1d/45°/45°

Multiple R	0,96
R Square	0,92
Adjusted R Square	0,91
Standard Error	2,87
Observations	11,00

Analysis of Variance

	<i>df</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	1,00	881,41	881,41	106,72	0,00
Residual	9,00	74,33	8,26		
Total	10,00	955,74			

	<i>Coefficient</i> <i>s</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Statistic</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	-10,53	1,34	-7,87	0,00	-13,56	-7,50
x1	0,84	0,08	10,33	0,00	0,65	1,02

Testi 2, dimensio 1 vastaan karheus Ra

Regression Statistics *Id/Ra*

Multiple R	0,77
R Square	0,59
Adjusted R Square	0,55
Standard Error	6,56
Observations	11,00

Analysis of Variance

	<i>df</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	1,00	568,14	568,14	13,19	0,01
Residual	9,00	387,60	43,07		
Total	10,00	955,74			

	<i>Coefficient</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Statistic</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	10,12	3,42	2,96	0,01	2,39	17,85
x1	-7,84	2,16	-3,63	0,00	-12,72	-2,96

Testi 2, dimensio 1 vastaan L*

Regression Statistics *Id/L**

Multiple R	0,60
R Square	0,35
Adjusted R Square	0,28
Standard Error	8,28
Observations	11,00

Analysis of Variance

	<i>df</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	1,00	338,89	338,89	4,94	0,05
Residual	9,00	616,85	68,54		
Total	10,00	955,74			

	<i>Coefficient</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Statistic</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	-469,76	211,27	-2,22	0,05	-947,69	8,17
x1	5,15	2,32	2,22	0,05	-0,09	10,39

LIITE 12

5(5)

Testi 2, dimensio 2 vastaan b*

Regression Statistics

Multiple R	0,80
R Square	0,63
Adjusted R Square	0,59
Standard Error	8,70
Observations	11,00

Analysis of Variance

	df	Sum of Squares	Mean Square	F	Significance F
Regression	1,00	1169,92	1169,92	15,46	0,00
Residual	9,00	680,93	75,66		
Total	10,00	1850,85			

	Coefficient	Standard Error	t Statistic	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	12,80	4,18	3,06	0,01	3,34	22,27
x1	6,29	1,60	3,93	0,00	2,67	9,91

Testi 3, dimensio 1 vastaan L*
Regression Statistics

Multiple R	0,89
R Square	0,80
Adjusted R Square	0,78
Standard Error	7,59

Analysis of Variance

	df	Sum of Squares	Mean Square	F	Significance F
Regression	1,00	2770,50	2770,50	48,15	0,00
Residual	12,00	690,45	57,54		
Total	13,00	3460,95			

	Coefficients	Standard Error	t Statistic	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	-419,57	60,50	-6,94	0,00	-551,39	-287,76
x1	4,44	0,64	6,94	0,00	3,05	5,84

Testi 3, dimensio 2 vastaan b*
Regression Statistics

Multiple R	0,73
R Square	0,54
Adjusted R Square	0,50
Standard Error	2,50
Observations	14,00

Analysis of Variance

	df	Sum of Squares	Mean Square	F	Significance F
Regression	1,00	86,71	86,71	13,83	0,00
Residual	12,00	75,22	6,27		
Total	13,00	161,93			

	Coefficient	Standard Error	t Statistic	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	0,65	0,69	0,94	0,36	-0,86	2,16
x1	0,65	0,17	3,72	0,00	0,27	1,02

Testi 5, b* vastaan dimensio 1

Regression Statistics

Multiple R	0,87
R Square	0,76
Adjusted R Square	0,73
Standard Error	2,38
Observations	11,00

Analysis of Variance

	<i>df</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	1,00	160,58	160,58	28,34	0,00
Residual	9,00	51,00	5,67		
Total	10,00	211,58			

	<i>Coefficient</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Statistic</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	-4,01	1,08	-3,73	0,00	-6,45	-1,58
x1	-1,85	0,35	-5,32	0,00	-2,63	-1,06

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
TIETOTEKNIIKAN TALOUS
KONNIEHEENTIE 2
02150 ESPOO